



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

FTC ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A JEHO APLIKACE V OBLASTI PŘÍMÉHO NAVÁDĚNÍ ROBOTU V PROSTORU

FTC CONTROL IN CONNECTION WITH INDUSTRIAL ROBOTS FOR DIRECT GUIDING IN
SPACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVOL STANO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POCHYLÝ

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavol Stano

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

FTC řízení průmyslových robotů a jeho aplikace v oblasti přímého navádění robotu v prostoru

v anglickém jazyce:

FTC Control in connection with industrial robots for direct guiding in space

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je seznámit se s možnostmi silomomentového řízení (FTC) průmyslových robotů Kuka a vytvořit prakticky orientovanou demonstrační aplikaci.

Cíle diplomové práce:

- (1) Seznamte se s využitím silomomentového řízení (FTC), jeho výhodami a nevýhodami. Vyhotovte také rešerši možných druhů FTC, které jsou v současné době dostupné na trhu.
- (2) Seznamte se s FTC senzorem Schunk FTC 50. Jeho vlastnostmi a možnostmi komunikace s průmyslovými roboty Kuka.
- (3) Vytvořte demonstrační aplikaci na průmyslovém robotu Kuka KR 15-2. Zaměřte se především na možnosti přímého ovládání pohybu robotu pomocí operátora.

Seznam odborné literatury:

- [1] L. Sciavicco, B. Siciliano: Robotics Modelling, Planning and Control. Springer London, 2008
- [2] PIRES, J. N. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future. Springer, 2007. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3
- [3] WOLF, A., STEINMANN, R. SCHUNK, H. Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks. Springer, 2005. 242 s. ISBN 978-3-540-27718-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Pochylý

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 26.11.2009

L.S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bc. Pavol Stano

FTC ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A JEHO APLIKACE V OBLASTI PŘÍMÉHO NAVÁDĚNÍ ROBOTU V PROSTORU

Diplomová práce, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2010.

Diplomová práce se zabývá aplikací silomomentového řízení průmyslových robotů v oblasti přímého navádění v prostoru. Obsahuje přehled druhů FTC řízení, různé varianty uspořádání robota se senzorem, a popis činnosti senzoru Schunk FTC-50. Dále řeší problém komunikace a nastavení použitých zařízení, řízení pohybu robotu do požadované polohy a korekce měřených hodnot sil a momentů pro přímé navádění v prostoru.

Klíčová slova:

Silomomentové řízení, přímé navádění v prostoru, Schunk FTC-50, RS 232, DeviceNet

Abstract

Bc. Pavol Stano

FTC CONTROL IN CONNECTION WITH INDUSTRIAL ROBOTS FOR DIRECT GUIDING IN SPACE

Master's thesis, Institute of Production Machines, Systems and Robotics, 2010.

Diploma thesis deals with an application of Force-Torque control in connection with industrial robot for direct guiding in space. It contains a summary of different kinds of FT control and various conceptions of robot-sensor connection and a description of Schunk FTC-50. The practical part is focused on the problem of setting-up the communication and setting-up of all devices used in this work, robot movement control to a desired position and compensation of forces and torques in relation to direct guiding in space.

Key words:

Force Torque control, direct guiding in space, Schunk FTC-50, RS 232, DeviceNet

Bibliografická citace:

STANO, P. FTC řízení průmyslových robotů a jeho aplikace v oblasti přímého navádění robotu v prostoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Pochylý.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Aleše Pochylého s využitím uvedených literárních zdrojů.

V Brně dne 27.5.2010

.....
Bc. Pavol Stano

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Aleši Pochylému za konzultace, cenné rady a věnovaný čas.

Obsah

Obsah	8
1. Úvod	10
2. Průmyslové roboty	11
2.1. Interakce ROBOT – ČLOVĚK	11
2.2. Řízení průmyslových robotů a jejich programování.....	12
2.3. Vlastnosti robotu.....	14
2.4. Adaptivita průmyslových robotů	15
2.4.1. Robot a technologické prostředí.....	15
2.4.2. Klasifikace adaptivních koncových efektorů	16
3. Silomomentové senzory	17
3.1. Stavba silomomentových senzorů.....	17
3.1.1. Odporové snímače napětí (tenzometry)	17
3.1.2. Piezo-odporové křemíkové senzory	18
3.1.3. Další odporové senzory	19
3.1.4. Piezoelektrické senzory	20
3.1.5. Kapacitní senzory	20
3.1.6. Optické senzory	21
3.2. Druhy FTC senzorů dostupných na trhu	26
3.2.1. ATI Industrial Automation.....	26
3.2.2. JR3, Inc.	27
3.2.3. AMTI Force And Motion	29
3.2.4. PCB Piezotronics.....	30
3.2.5. FUTEK Advance Sensor Technology, Inc.....	31
3.2.6. Schunk GmbH & Co.KG	32
4. Možnosti propojení systému ROBOT - SENZOR.....	35
4.1. Varianta 1: Běžné uspořádání systému robot - silomomentový senzor.....	35
4.2. Varianta 2: Silomomentový senzor upevněn na stole.....	36
4.3. Varianta 3: Uspořádání s externí osou.	36
5. Průmyslové sítě	38
5.1. DeviceNet síť	38
5.1.1. DeviceNet a CAN	38
5.1.2. Spojení DeviceNet	39

5.2. Sériová linka RS 232.....	41
6. Experimentální část	43
6.1. Koncepce propojení robota se silomomentovým senzorem	43
6.2. Popis zařízení - HARDWARE	44
6.2.1. KUKA KR3	44
6.2.2. PLC Beckhoff	45
6.2.3. Schunk FTC-050-80-V	46
6.3. Popis zařízení – SOFTWARE.....	47
6.3.1. TwinCAT	47
6.3.2 KSS – Kuka System Software.....	48
6.4. Nastavení komunikace.....	49
6.5. Regulace silomomentového řízení	50
6.6. Princip činnosti	51
7. Závěr	57
8. Použitá literatura	58
9. Přílohy	60
9.1. Program senzor FTC	60
9.2. Program pohyb robotu	64
9.3. Fotografie pracoviště	65

1. Úvod

Robotizace a automatizace pracovišť je jedním z faktorů snižování nákladů i potřeby kvalifikovaných pracovních sil. Jejím prvotním záměrem je postupné osvobozování člověka od jednotvárné, monotónní, těžké práce a náhrada lidské práce ve zdraví škodlivém nebo jinak nebezpečném prostředí.

Dosavadní vývoj prostředků robotizace a automatizace byl orientován především na velké podniky a velkosériovou výrobu. Dnes ovšem i pro střední a malé podniky vyšší stupeň automatizace výrobních procesů připadá v úvahu. Avšak roboty na rozdíl od aplikací ve velkosériové výrobě musí být daleko více flexibilní a jejich obsluha méně náročná.

Silomomentové řízení nezaručuje jenom dodržování přesných hodnot sil a tím zvyšování kvality procesů, ale taky umožňuje použití robotů v těžko dostupných oblastech aplikací. Průmyslový robot vybaven silomomentovým senzorem otevírá nové možnosti k řešení různých aplikací jako výsledek jeho řízení styku mezi samotným robotem a pracovním prostředím. To umožňuje interakci mezi mechanickou jednotkou a jeho ovlivňovaným prostředím. Naměřené hodnoty jsou tak vstupními hodnotami v silomomentovém řízení pro vykonání změn pohybu mechanické jednotky.

Senzor nabízí několik výhod hlavně při seřizování nepřesností polohy obrobku, nástroje, nebo dalších procesech sestavování a montáží. A zvláště monitorování a kontrola vzniku kolizí v aplikacích manipulace slouží jako ochrana obrobku nebo nástroje.

U robotizovaných pracovišť platil striktní zákaz vstupu do pracovní zóny robotu. Postupně se ale ukazuje, že v některých případech je technicky i ekonomicky vhodné přímo propojit činnost lidské obsluhy s provozem robotu nebo paralelně vedle sebe nechat probíhat efektivně oba druhy operací s využitím odlišných schopností. Vývoj snímacích senzorů s vyhodnocováním v reálném čase dospěl tak daleko, že dokáže zamezit náhodné kolizi, nehledě na to, že vedle různých virtuálních bezpečnostních závěsů jsou už dnes aplikovány při smíšené službě v rámci jistění bezpečnosti i různé protikolizní způsoby řízení robotů, většinou s poklesem pracovní rychlosti.

2. Průmyslové roboty

Morfologie robotu je odvozena od jeho kinematické struktury v závislosti na použitých konstrukčních prvcích. Významnou veličinou je počet stupňů volnosti. Běžné průmyslové roboty mívají až 6 stupňů volnosti. Počet stupňů volnosti není určujícím faktorem pro rozhodnutí o úrovni průmyslového robotu, dává mu pouze větší či menší pohybové a manipulační možnosti.

Vlastní velikost a hmotnost souvisí pochopitelně se stavbou daného průmyslového robotu a s jeho plánovaným užitím. Samozřejmou snahou konstruktéra je, aby hmotnost pohybujících se částí a skupin byla co nejnižší při zachování potřebné pevnosti a tuhosti.

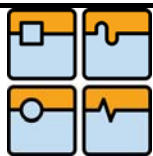
Hmotnost břemene je jedním ze základních parametrů, určujícím možné použití průmyslového robotu. Je nutno si uvědomit, že do hmotnosti břemene se započítává též hmotnost úchopného mechanismu - výstupní hlavice, takže čistá hmotnost manipulovaného břemene bude vždy podstatně nižší.

Dosahovaná přesnost je velmi důležitým údajem o průmyslovém robotu. Protože se jedná o otevřený kinematický mechanismus, bude i při použití podobných ústrojí, jako u výrobních strojů, výsledná přesnost robotu vždy nižší, řádově asi 100 krát. Některé průmyslové roboty dosahují opakované přesnosti nastavení polohy až $\pm 0,01$ mm. Přesnost robotu je ovšem velmi závislá na jeho zatížení a proto je nutné sledovat, při jaké hmotnosti břemene je schopen průmyslový robot výrobcem proklamovanou dosažitelnou přesností skutečně zabezpečit.

Rychlost pohybů je další veličinou, závislou jednak na druhu použitých pohonů, ale také na okamžitém zatížení robotu, a to ve vztahu k dosažitelné přesnosti. Čím větší bude okamžité zatížení, tím bude obtížnější dosáhnout maximální rychlosti a též i přesnosti.[1, 3]

2.1. Interakce ROBOT – ČLOVĚK

Přímá spolupráce mezi člověkem a robotem nabízí množství výhod v oblasti robotizovaných výrobních technologií. Toto spojení otevírá nové možnosti týmové práce a to v lepší flexibilitě, přesnosti a větší všestrannosti pracovního procesu. Roboty tak můžou spravovat větší počet úloh, co ve skutečnosti znamená méně použitých zařízení a tím i menší pracovní prostor. To umožňuje snížení až 20% potřebného prostoru a 5% snížení výrobního vybavení. [2]



Donedávna nebylo možné aby člověk s robotem pracovali spolu, protože stroje neměli dostatečně vysokou inteligenci. Avšak dnes nové bezpečnostní robotické systémy umožňují vstup člověku do oblasti, kde právě pracuje robot, aniž by byla ohrožena bezpečnost člověka. Jedním z příkladů vzájemné spolupráce je přemísťování a montáž těžkých částí v automobilovém průmyslu, kde člověk v určitých bodech koriguje nebo řídí pohyb robotu pomocí joysticu.



Obr.1: Spolupráce člověka s robotem [2]

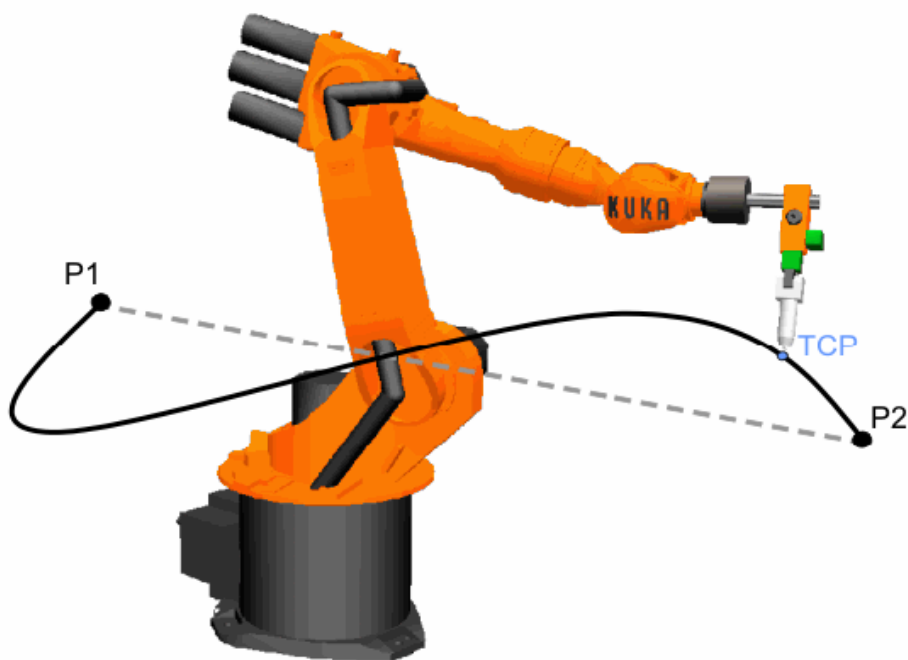
2.2. Řízení průmyslových robotů a jejich programování

Systémy řízení průmyslových robotů mají úzkou souvislost s číslicovým řízením výrobních strojů. V podstatě se rozlišují na dva druhy řízení:

- bodové řízení = PTP (point to point)
- dráhové, lineární řízení = CP (continuous path)

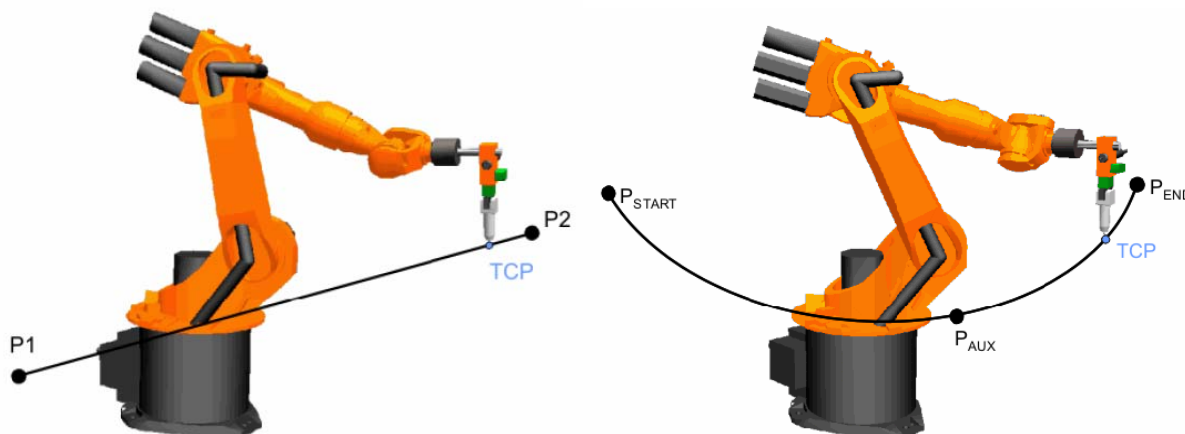


Bodové řízení se využívá tam, kde je nutné dosahovat toho, aby robot zasahoval do požadovaných jednotlivých bodů operačního prostoru, aniž by mezi těmito body byla nějaká funkční souvislost. Robot se pohybuje podél nejrychlejší dráhy k cílovému bodu. Nejrychlejší dráha není zpravidla nejkratší dráha a tím také žádná přímka.



Obr.2: Bodový pohyb robota – PTP [7]

Dráhové řízení je nutné tehdy, je-li pohyb robotu funkčně vázán k technologickému procesu. Robot se pohybuje definovanou rychlostí podél nejkratší dráhy k cílovému bodu (nejkratší dráha je vždy přímka) nebo podél kruhové dráhy, která je definována startovním, pomocným a cílovým bodem.



Obr.3: Dráhový pohyb robota – po přímce a po kruhové dráze [7]

Problematika řízení průmyslových robotů dále zavádí pojem "UČENÍ ROBOTU". Učení robotu se často označuje jako "PLAY-BACK" nebo "TEACH-REPEAT" a dělíme ji na:

- *online programování* – pomocí programovacího panelu, kdy se příslušnými tlačítky robot nastavuje do požadovaných bodů a ukládají se souřadnice nebo druh pohybu.
- *offline programování* – při tomto způsobu programování je programována trajektorie pohybu ve formě křivek v prostoru, např. podle výkresů nebo 3D modelů.
- *bezprostřední* – přímým vedením výkonného orgánu robotu po požadované dráze v cyklu zapamatování a následného automatického vykonání v cyklu opakování. Dnes je to starý přístup s novými technologiemi.

2.3. Vlastnosti robotu

Manipulační schopnost - schopnost uchopovat objekty, přenášet je a provádět na nich úpravy, případně vykonávat montážní činnost a manipulaci s nástroji, a to i ve smyslu práce s nimi, tedy pracovat jako výrobní zařízení.

Univerzálnost - zařízení neslouží pouze jednomu účelu, ale po změně programu, chapadel nebo nástrojů je možné jej použít i pro jiné účely a na jiném pracovišti.

Možnost vnímání - pomocí čidel (senzorů) napodobujících svaly člověka. Příkladem může být vizuální vazba, odpovídající u člověka zraku; akustická vazba sluchu; doteková vazba hmatu; a vazba čidli přinášející informace, jejichž příjem je pro člověka nemožný.

Autonomnost chování - schopnost vykonávat automaticky složitou posloupnost úkolů podle určitého programu. Důležité je, že program není pevný, ale je volitelný buď člověkem nebo automaticky vlastním zařízením. [1, 3]

2.4. Adaptivita průmyslových robotů

Adaptivita je proces, při kterém se systém přizpůsobuje změnám, které probíhají uvnitř, eventuálně mimo něj. Adaptivnost (adaptivita) je schopnost přizpůsobit se stavu systému. Adaptivní průmyslový robot je definován jako průmyslový robot s vyšší úrovní řízení, který je schopen, v průběhu své činnosti, měnit své chování tak, aby byla splněna požadovaná kvalita činnosti soustavy. Toto své chování mění v závislosti na změně stavu parametrů okolí. Takto uzpůsobené průmyslové roboty jsou pro běžné využití prozatím ještě značnou výjimkou. Rozhodující je především cena takového zařízení v bezprostřední návaznosti na složitost a dostupnost zejména sensorové techniky, umožňující potřebné rozpoznávání a vyhodnocování pracovní scény robotu. Ve výrobních a montážních systémech s průmyslovými roboty se adaptivita v současné době zavádí především ve svařovacích technologiích a diskrétní (součástkové) manipulaci. [6]

2.4.1. Robot a technologické prostředí

Pro další činnost robotu je významné rozpoznat, že dotyk skutečně nastal, stanovit souřadnice bodů dotyku (lokalizaci) a charakter dotyku vyhodnocením například velikosti vzniklých reakčních sil a momentů. Pro kompenzaci interakce jsou adaptivní roboty vybavovány taktilními čidly a senzory sil a momentů, které uskutečňují snímání velikosti sil (momentů) v kloubech ramene a ruky manipulátoru (metoda přímá), případně se zjišťují změny v zátěži pohonů (metoda nepřímá). Další senzory, umístěvané co nejbližší vzniku interakčních sil, tedy nejčastěji v zápěstích a chapadlech, zprostředkovávají informace o sevření předmětu, popř. zatížení koncového členu, jeho interakci s překážkami v prostředí, o prokluzu předmětu v chapadle apod. Senzory bývají součástí deformačních konstrukčních prvků umožňujících měření deformací ve třech ortogonálních osách. Vlastní senzory mohou být tenzometrické, piezoelektrické, magnetostrikční, magnetické, atd.

Pro realizaci řízení je robot vybaven silomomentovými čidly, které uskutečňují měření složek vektorů sil a momentů v souřadném systému čidel. Jsou konstrukčně umístěvané co nejbližší k místům vzniku interakčních sil, nejčastěji do zápěstí kinematického řetězce robotu. Čidla obsahují deformační konstrukční prvky a snímače pro měření deformací ve třech ortogonálních osách. [6]

2.4.2. Klasifikace adaptivních koncových efektorů

Adaptivní koncové efekty jakož i kompenzátory polohy lze rozdělit následujícím způsobem:

Tab.1: Klasifikace adaptivních koncových efektorů [6]

Adaptivní koncové efekty průmyslových robotů		
Mechanické	Pasivní	Samoupínací mechanismy
	Aktivní	S mechanickým řízením a přizpůsobováním (tzv. mechanická adaptivita)
Senzorické	Pasivní	Poddajné členy bez vlastní korekce pro vertikální montáž
	Aktivní	Poddajné členy s vestavěnou samočinnou korekcí polohy – pro obecnou montáž
S řídicím systémem typu "master-slave"		Biomechanické a protetické aplikace

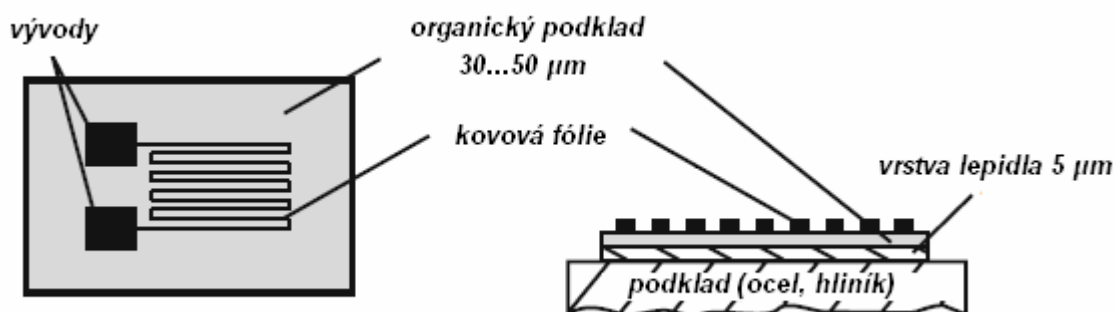
3. Silomomentové senzory

3.1. Stavba silomomentových senzorů

Použití dotykových zařízení má samo o sobě mimořádný význam, protože robotický systém přichází často do mechanického kontaktu s jinými objekty. Právě proto musí být jasné, jaké zařízení se zamýšlí použít, např.: použití telemanipulátoru pro medicínské účely, nebo CAD nástroj se zpětnou vazbou.

3.1.1. Odporové snímače napětí (tenzometry)

Jeden z nejčastěji používaných principů snímání napětí je založen na zjišťování odporu na měřeném objektu. Pro odporové měření napětí se aplikuje soustava odporů na povrch ohybového elementu. Odporů se umísťují na místa největšího napětí. Deformace zapříčiní na jedné straně geometrickou změnu elementu a na straně druhé změnu odporu. Změnu odporu můžeme měřit pomocí tenzometrů, které jsou zapojeny do Wheatstoneova můstku.

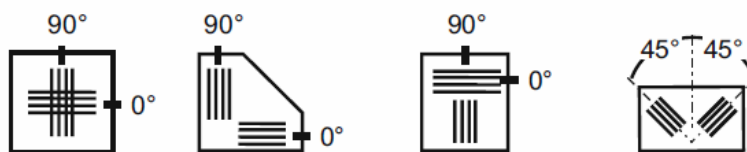


Obr.4: Stavba konvenčního tenzometru [4]

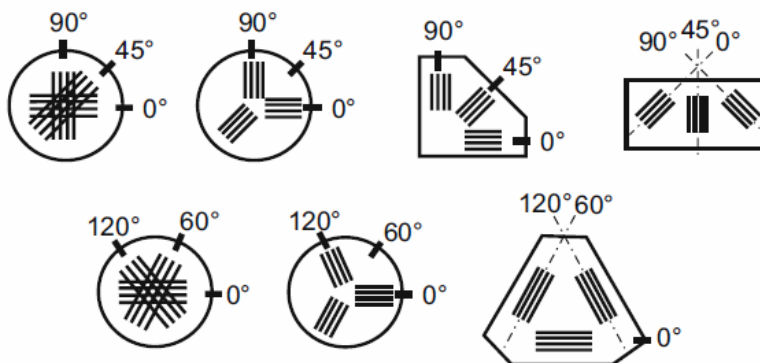
Tenzometry se vyrábí různými technologiemi a v různém provedení. Nejběžněji používány jsou fóliové tenzometry, které se nachází hlavně v OEM senzorech a používají se pro specifická řešení v automatizaci a výrobních procesech. Jsou to vícevrstvé systémy složené z kovové mřížky a organického podkladu (základu). Taky rozeznáváme několik typů různého umístění tenzometrů (viz Obr.5).



dvouprvkové tenzometrické růžice pro měření povrchového napětí



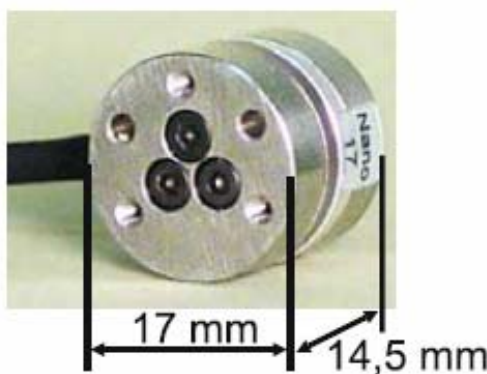
tříprvkové tenzometrické růžice pro měření povrchového napětí



Obr.5: Srovnání možných způsobů uspořádání tenzometrických růžic [4]

Kromě odporových foliových tenzometrů lze použít také tenko-/tlusto- stěnné nebo polovodičové tenzometry. Jejich základní stavba je srovnatelná s konvenčními tenzometry.

Polovodičové tenzometry jsou zvláště důležité pro stavbu miniaturních silomomentových senzorů např.: komerčně dostupný senzor ATI Nano 17.



Obr.6: Miniaturní provedení silomomentového senzoru [11]

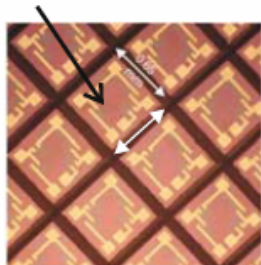
3.1.2. Piezo-odporové křemíkové senzory

Polovodičové materiály se symetrickou krystalickou strukturou jako křemík nebo germanium nabízí různé aplikace v oblasti zjišťování síly nebo tlaku pomocí změny jejich vodivosti. Právě pro tyto aplikace se využívá případ vhodného seskupování více jednotlivých



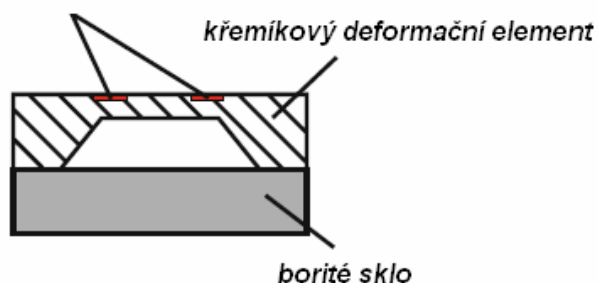
piezoelektrických polovodičových senzorů do jakéhosi pole k měření jednoosé síly nebo tlaku rozloženého na povrchu.

element tlakového senzoru



a)

piezoelektrické oblasti



b)

Obr.7: Příklady piezoelektrických senzorů; [4]

a) pole piezoelektrických senzorů; b) příčný řez senzoru

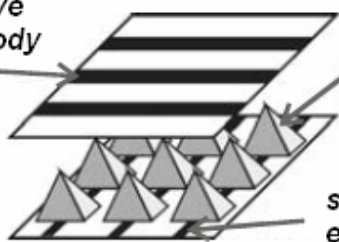
Rozměry samotného elementu senzoru se pohybují od 200 μ m do 2mm s jmenovitou silou v rozmezí 300mN až 2N.

3.1.3. Další odporové senzory

Kromě tradičních konvenčních odporových snímačů existují další senzory s více "exotičtější" stavbou. Tyto senzory jsou vhodné pro sestavení do pole a měření vzájemné pozice tlaku a síly. Princip měření je založen na změně geometrických parametrů elementů síly. Kromě dobré citlivosti na sílu, senzory vykazují teplotní závislost jenom 0,5% K. [4]

S rostoucím tlakem roste plocha elektrického kontaktu a klesá odpor. Elektrody jsou uspořádány do vrstev řádků a sloupců. V první variantě je mezera mezi elektrodami vyplněna vodivými jehlany a ve variantě druhé elektricky vodivou kapalinou. Ta se v zatěžujícím stavu vytlačí ven a vzdálenost mezi elektrodami se změní. Ale do dneška je tento princip ještě stále předmětem výzkumu.

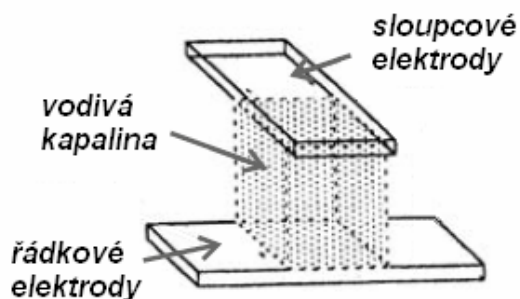
řádkové elektrody



vodivé jehlany

sloupcové elektrody

vodivá kapalina



Obr.8: Příklady senzorů používajících efekt odporu závislého na stlačení elektrod [4]

Tyto senzory se ve foliovém provedení používají v ortopedii k zjišťování rozložení tlaku uvnitř bot, v protetice nebo v automobilovém průmyslu pro ergonomické studie.

3.1.4. Piezoelektrické senzory

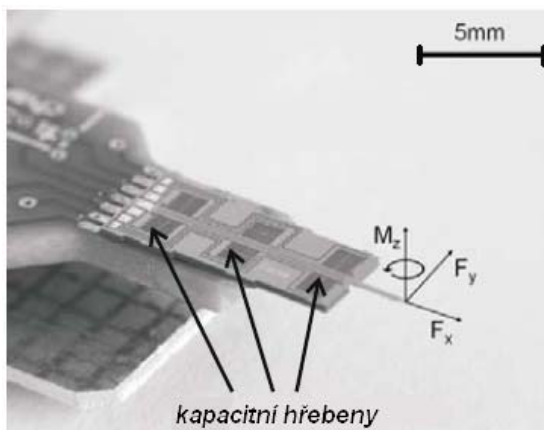
Piezoelektrické senzory jsou široce použitelné v oblasti pro měření vysoce dynamických činností. Princip měření je založen na zjištění změn indukovaného náboje uvnitř piezoelektrického materiálu. Změny náboje vedou k další polarizaci mající za následek změny náboje na povrchu a to je možné měřit pomocí elektrod. Typické použití piezoelektrických senzorů je v oblasti analýzy dynamicky působících sil vyskytujících se při vrtání a frézování. V úchopovém hmatovém systému můžeme tento typ senzorů najít jen stěží, protože nejsou úplně vhodné pro měření statického zatížení.

3.1.5. Kapacitní senzory

Na rozdíl od principu odporových snímačů se proměnné mechanické veličiny jako síla nebo napětí měří přímo. Co se týče principu činnosti, můžeme rozlišit tři varianty. První dvě jsou založeny na principu vychýlení, kde mechanická zátěž změní vzdálenost mezi elektrodami nebo se mění aktivní plocha elektrod. Ve třetím případě se ovlivňuje relativní permitivita mezi elektrodami.

Podle technologie výroby můžou být kapacitní senzory rozděleny do tří skupin:

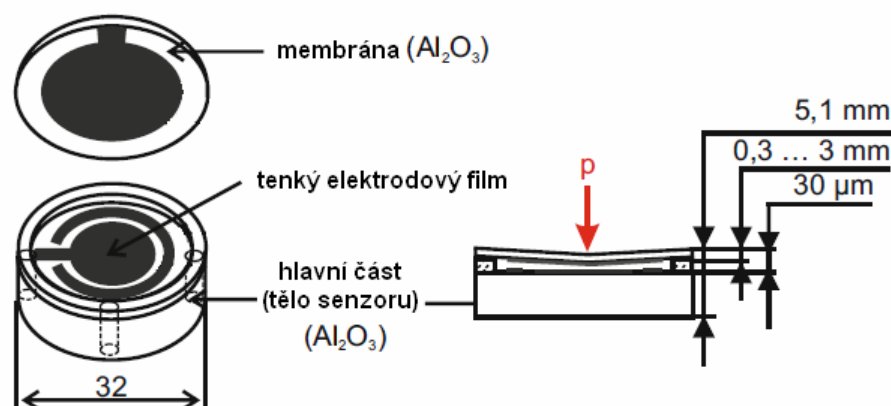
1. skupina - je tvořena miniaturizovanými senzory napětí, které jsou vyrobeny pomocí křemíkové mikrotechnologie. Díky jejich malé velikosti (jenom několika mm) jsou setrvačné účinky hmoty senzoru malé a tak pokrývá široký dynamický rozsah. Tyto mikro-kapacitní senzory bývají často kombinované do polí pro měření prostorově rozloženého zatížení.



Obr.9: Kapacitní senzor síly; normálové zatížení 1,5 mN [4]

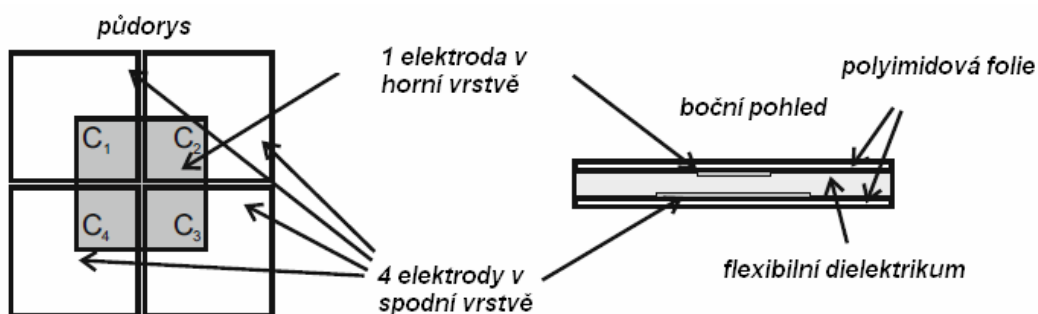


2. skupina - je reprezentována keramickými napěťovými siloměry široce rozšířených v automobilovém průmyslu a v průmyslové technologii. Podklad i měřící membrána jsou vyrobeny z Al_2O_3 keramiky a oproti křemíkovým senzorům jsou keramické senzory spíše makroskopické a mají velikost v rozpětí několika cm.



Obr.10: Schematický pohled na keramický napěťový senzor [4]

3. skupina - jsou foliové senzory sestavené do matrice (pole), kde podkladem je flexibilní polymer. Ve spodní vrstvě se nachází 4 elektrody a ve vrchní jenom 1. Normálová síla se zjišťuje měřením změn vzdálenosti elektrod a síla smyková je měřena změnou aktivní plochy elektrod.



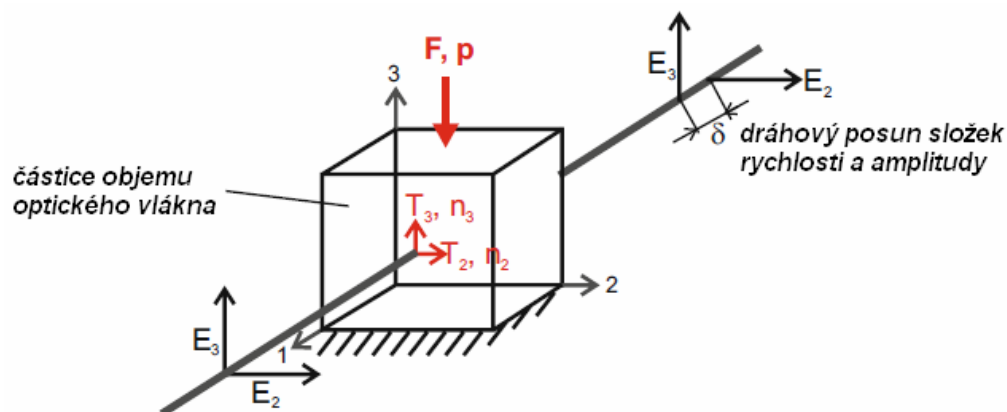
Obr.11: Schematický pohled na kapacitní smykový senzor [4]

3.1.6. Optické senzory

U optických senzorů je technologie měření založena na volně šířitelných paprscích a dostupnosti optických vláken. Právě optické vlákna se často používají k snímání síly a napětí. Všechny tyto senzory mají ve zvyku, že mechanické zatížení má vliv na přenosové parametry a to ve výsledku ovlivňuje parametry odraženého a přeneseného elektromagnetického vlnění.



V závislosti na indexu lomu se mění vlnová délka i fázový posun paprsku. To znamená, že mechanické zatížení změní podmínky vedení a směr paprsku.

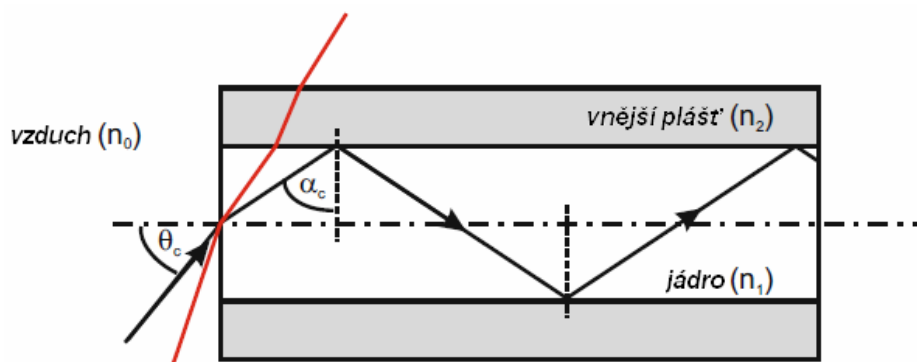


Obr.12: Vizualizace fotoelastického jevu: v důsledku přechodu z jednoho prostředí do druhého se mění směr šíření vlnění i velikost rychlosti.

Teplota je u optických senzorů zdrojem všech rušení. Index lomu je taky závislý na změnách teploty a to má následně vliv na vlastnosti vedení vlnění. A proto se pro kompenzaci vlivu teploty používá referenční vlákno, které je v nezatíženém stavu ovlivněno jenom změnou teploty. Však výhodou všech opto-vláknových senzorů je jejich imunita vůči elektromagnetickému záření.

Princip měření

Princip měření je založen na principu změny intenzity a teda na změně úhlu θ_c mezi paprskem a osou vlákna. Když se úhel změní vlivem mechanického zatížení a nadobude hodnoty větší než θ_c resp. menší než α_c , podmínky pro úplný odraz jsou narušeny. Paprsek tudíž neprojde tělem vlákna a tak celková intenzita přeneseného záření klesá.

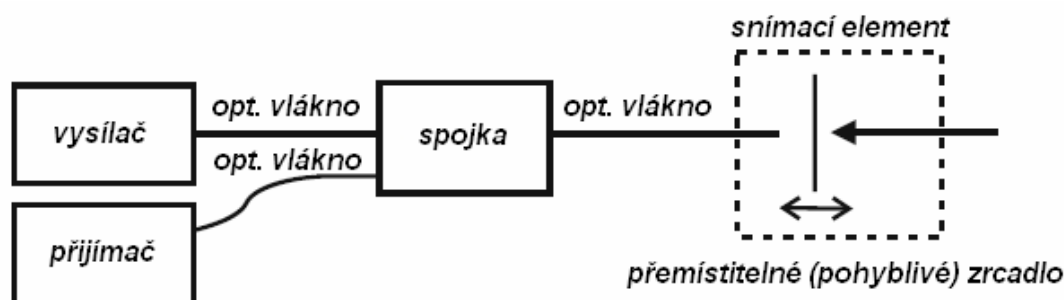


Obr.13: Vedení v multividovém vlákně: Paprsky vstupující pod úhlem větším než θ_c nejsou dále vedeny v těle vlákna. [4]



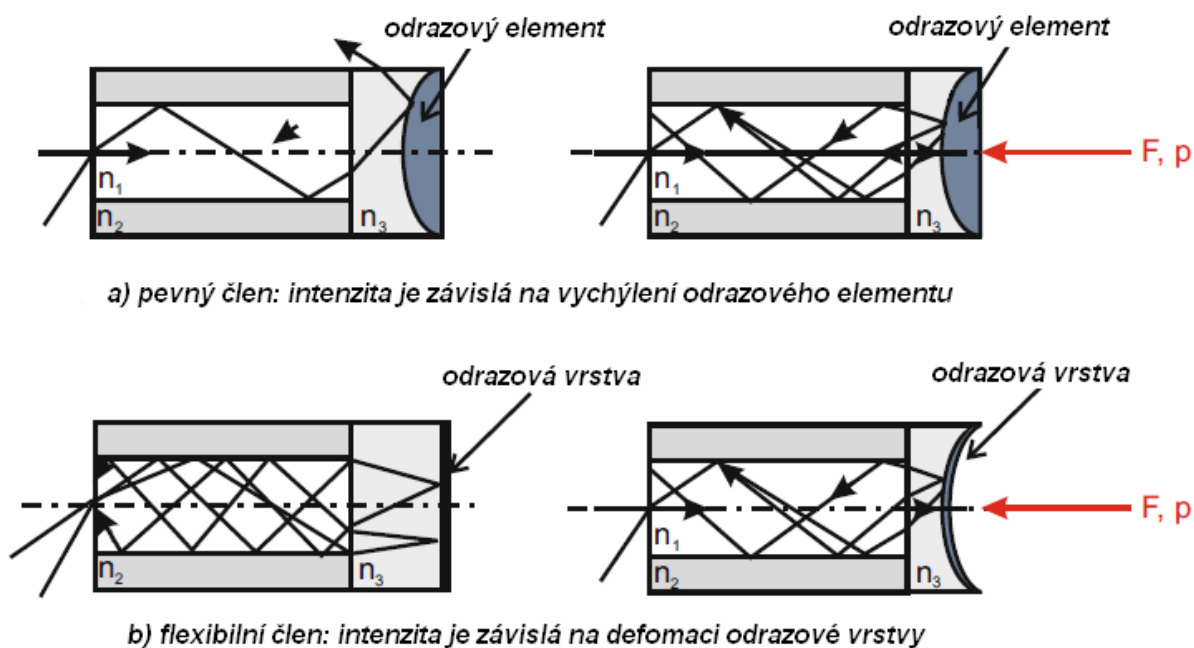
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jeden z prvních optických senzorů je tvořen vysílačem světelného záření, který je spojen multividovým optickým vláknem se snímacím reflexním členem.



Obr.14: Schematický pohled na optický senzor s modulátorem jasu záření

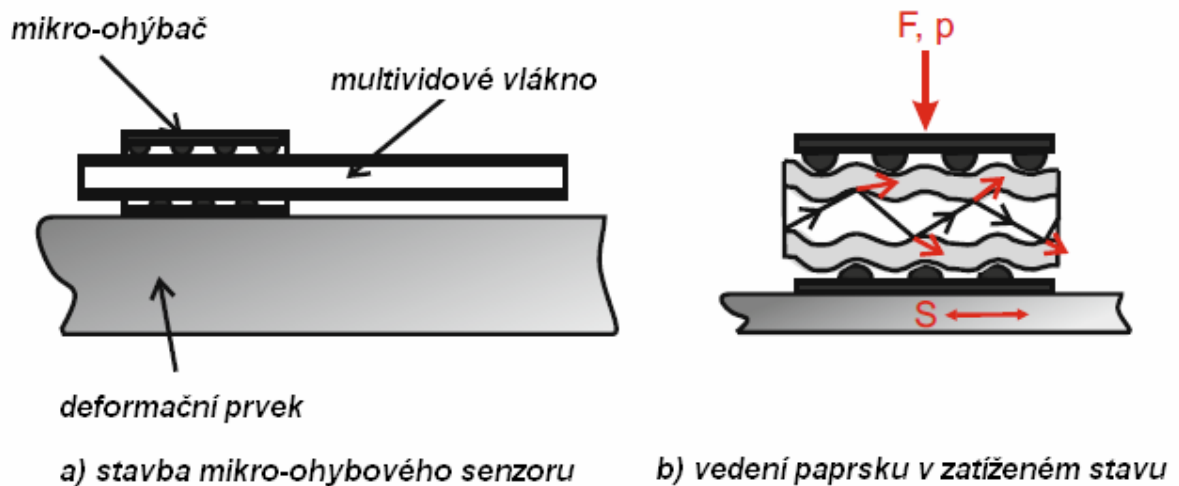
Tento člen může být navržen jako samostatný deformovatelný element nebo jako pevný a připevněný na deformovatelný podklad. Podle toho se při zatížení reflexní člen deformuje nebo posouvá. Intenzita odraženého záření je přímo úměrná vychýlení nebo deformaci reflexního elementu a podle zákonů optiky se paprsek odráží, láme nebo rozptyluje.



Obr.15: Různé varianty výsledné intenzity v důsledku vychýlení pevného nebo flexibilního odrazového členu [4]

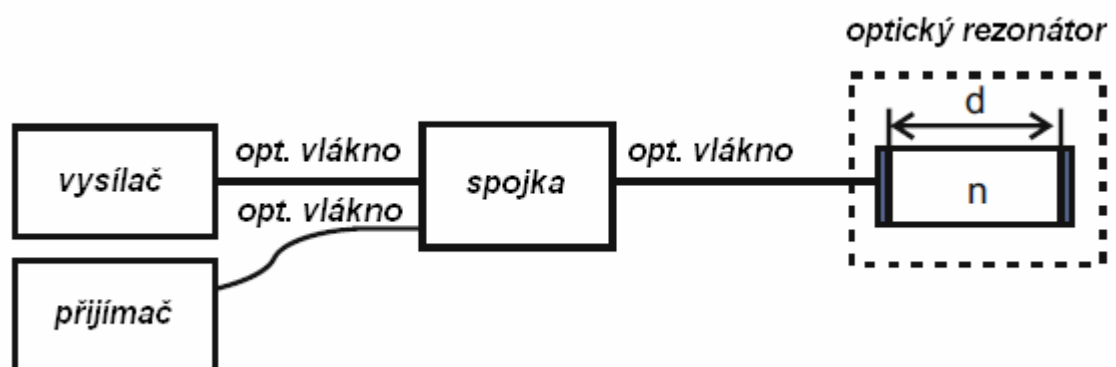
Další varianta se nazývá "mikro-ohybový" senzor. Tak jako v předchozím případě se paprsek vede v multividovém vlákně. Mechanická zátěž působící na optické vlákno pomocí jakési hřebenové konstrukce vytvoří jak na povrchu, tak uvnitř vlákna mikroohyby a v místě

deformace se část záření rozptyluje do vnějšího pláště. Intenzita měřeného záření se po přechodu tímto místem zmenší. Rozestup mezi jednotlivými výběžky hřebene bývají v rozmezí 1mm. Čím menší je poloměr zubů hřebene, tím nižší nominální síly nebo napětí je možné použít a měřit.



Obr.16: Mikro-ohybový optický senzor [4]

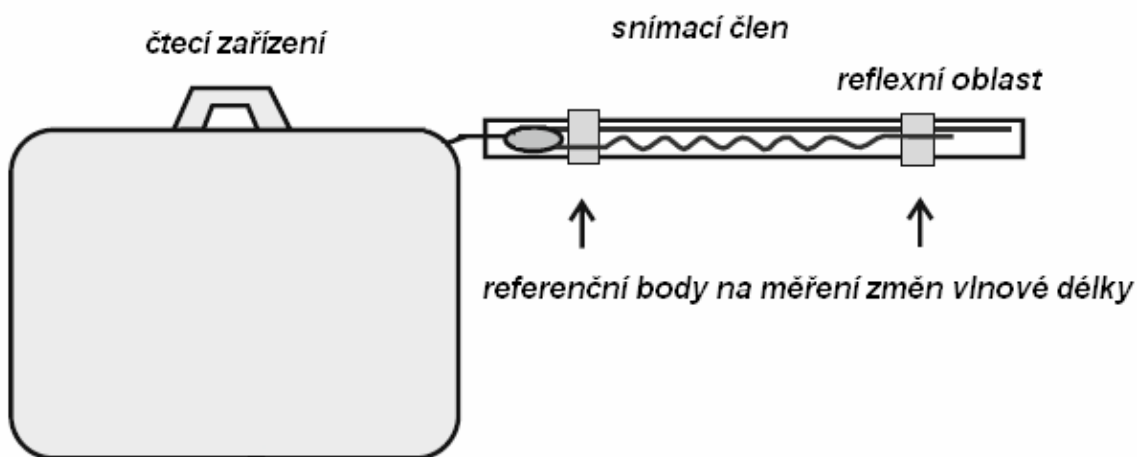
Na jiném principu - principu změny fáze záření jsou založeny interferometrické senzory. Základ tvoří optický rezonátor, který je složen ze dvou plochých paralelních reflexních a polopropustných desek na konci vlákna. Paprsek se několikrát odrazí uvnitř rezonátoru a interferuje s každým odrazem.



Obr.17: Schéma interferometrického senzoru

Působením mechanické zátěže se vzdálenost "d" obou povrchů desek mění a tím se střídají podmínky pro tvorbu interference. Tento typ senzoru se používá pro měření jednoosé síly a napětí až do 69 bar.

Vliv teploty je zapotřebí brát v úvahu protože způsobuje nepřesnosti v měření. Proto musí být kompenzován pomocí referenční paralelní konfigurace, která pozůstává ze dvou multivíkových optických vláken, přičemž napětí působí jenom na jedno. Při měření se porovnává fáze referenčního a zatíženého záření.



Obr.18: Kompenzace vlivu teploty v interferometricko-optickém snímači [4]



3.2. Druhy FTC senzorů dostupných na trhu



3.2.1. ATI Industrial Automation

Senzory značky ATI měří všech 6 složek sil a momentů (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z). Obsahují křemíkové napěťové tenzometry pro jejich vynikající odolnost vůči rušení. Tyto senzory mají vyšší tuhost, čímž se zvyšuje ochrana proti přetížení.

Hlavní výhody:

- ochrana proti přetížení – F/T snímače jsou odolné a mají vysokou trvanlivost
- odolnost vůči rušení – signál je až 75 krát silnější než u konvenčních foliových tenzometrů. Tento signál je dál zesilován až s téměř nulovým rušením.
- vysokorychlostní výstup – F/T systém poskytuje obnovovací frekvenci až 28,5kHz, co plně pokrývá požadavky v oblasti robotiky
- všestranné výstupy – senzor obsahuje výstup PCI, Analogový výstup, USB, PCMCIA, digitální I/O, atd...
- kompenzace účinků teploty – každý F/T senzor obsahuje hardware ke kompenzaci a stabilizaci účinků teploty v rozmezí $\pm 25^\circ\text{C}$ od normální pokojové teploty.

Typy:

NANO 17 – jeden z nejmenších F/T senzorů na světě. Používá se v zubní technice, výzkumu robotických článků prstů...

GAMMA – tělo senzoru je vyrobeno z vysokopevné slitiny hliníku. Stupeň krytí IP60 nebo IP65 chrání senzor před vodnými parami. Používá se k řízení sil v reálném čase v robotice, automobilovém průmyslu k testování součástí, atd...



Obr.19: Tenzometrický silomomentový snímač Gamma [11]



OMEGA – senzory mají extrémně vysokou tuhost, tělo senzoru je vyrobeno s nerezové oceli. Stupeň krytí IP60 nebo IP65 chrání senzor před vodnými parami a IP 68 je vodotěsný do hloubky 10m. Používá se pro účely výzkumu, v telerobotických aplikacích a k testování.

Tab.2: Základní hodnoty snímačů značky ATI [11]

	NANO 17	GAMMA	OMEGA
F_x	50N	130N	40kN
F_y	50N	130N	40kN
F_z	70N	400N	88kN
M_x	500Nmm	10Nm	6000Nm
M_y	500Nmm	10Nm	6000Nm
M_z	500Nmm	10Nm	6000Nm
D (průměr)	25mm	75mm	330mm
H (výška)	14,5mm	33mm	110mm
m (hmotnost)	9,1g	254g	47kg



3.2.2. JR3, Inc.

Senzory značky JR3 měří veličiny v 6-ti stupních volnosti (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z). Obsahují foliové napěťové tenzometry svázané do vícenásobných snímacích elementů. Ve většině modelů jsou analogová data převáděna do digitální formy pomocí elektronického systému. Tělo senzorů je vyrobeno ze slitin hliníku nebo nerezové ocele.

Typy:

Série M – senzory série typu M mají nejlepší poměr cena – výkon. Jsou odolné vůči rušení, mají analogový nebo digitální výstup a pro cenovou výhodnost je zapojení tenzometrů v polovičním můstku. Používají se v robotických aplikacích. Obsahují zesilovač signálu, převodník analogového na digitální signál. Výstupní rychlost dat je 2Mbit/s.



Obr.20: Víceosý snímač sil a momentů 90M40 značky JR3 [12]

Série E – tyto senzory vynikají vysokou přesností, obsahují více zátěžných ohybových elementů pro vyšší maximální hodnoty sil a tenzometry jsou zapojeny do celého můstku pro největší výkon.

Tab.3: Základní hodnoty snímačů značky JR3 [12]

	50M31	90M40	160M50	75E20
F_x	100N	400N	1000N	1000N
F_y	100N	400N	1000N	1000N
F_z	200N	800N	2000N	2000N
M_x	5Nm	40Nm	160Nm	200Nm
M_y	5Nm	40Nm	160Nm	200Nm
M_z	5Nm	40Nm	160Nm	200Nm
D (průměr)	50mm	90mm	160mm	75mm
H (výška)	31mm	40mm	50mm	20mm
m (hmotnost)	140g	454g	2,2kg	3,4kg



3.2.3. AMTI Force And Motion

Senzory značky AMTI nabízí měření hodnot v 6-ti stupních volnosti a to zatížení ve třech směrech (F_x , F_y , F_z) a příslušných momentů (M_x , M_y , M_z). Tyto víceosé senzory byli použity v experimentálních aplikacích NASA, ale i v průmyslu pro robotické aplikace. Obecně mají vysokou tuhost, velmi dobrou citlivost, teplotní stabilitu (-17°C až $+52^{\circ}\text{C}$) a vynikající opakovatelnost.

Senzory se dělí podle typu použití do několika kategorií:

- senzory pro běžné použití v robotizaci
- senzory pro strojní zařízení v oblasti obrábění
- vodotěsné senzory

Typy:

MC1 – je nejmenší a vodotěsný senzor. Tělo je vyrobeno z nerez a je vhodný pro aplikace měření sil a momentů pod vodní hladinou.

FS6 – je určen pro běžné aplikace v průmyslu – robotizace, automatizace, atd... Tělo senzoru je vyrobeno z vysokopevné slitiny hliníku a povrchově upraveno kvůli odolnosti vůči korozi.



Obr.21: Snímač sil a momentů FS6 značky AMTI [13]



MC8 – je senzor s největší měřitelnou kapacitou hodnot sil a momentů. Používá se v aplikacích pro výzkum a vývoj v obrábění a robotice nebo pro monitorování výrobních procesů. Tělo senzoru je vyrobeno z nerezů a je odolné jak vůči vodě tak i oleji.

Tab.4: Základní hodnoty snímačů značky AMTI [13]

	MC1	FS6	MC8
F_x	550N	1100N	89kN
F_y	550N	1100N	89kN
F_z	1100N	2200N	133kN
M_x	5,5Nm	56Nm	13500Nm
M_y	5,5Nm	56Nm	13500Nm
M_z	5,5Nm	28Nm	6780Nm
D (průměr)	25mm	38mm	290mm
H (výška)	82mm	64mm	203mm
m (hmotnost)	89g	100g	36kg



3.2.4. PCB Piezotronics

Tyto senzory jsou určeny speciálně k detekci, měření a k řízení sil, momentů, napětí, tlaku a rázů. Používají se k řízení a monitoringu řezných nástrojů, biomechanice, automobilním a leteckém průmyslu a robotice.

Specifické vlastnosti senzorů:

- tuhost – tato struktura nabízí extrémně rychlou odezvu a přesné zachycení měřených hodnot
- životnost – senzor vykazuje dlouhou životnost použitím piezoelektrického principu
- odolnost vůči přetížení – senzor unese až 15 krát větší přetížení než je jeho kapacita
- malá velikost – senzory mají až o polovinu menší velikost

Typy:

Series 1102 – základní obecný senzor

$$F_x = 440N$$

$$M_x = 11Nm$$

$$m = 304g$$

$$F_y = 440N$$

$$M_y = 11Nm$$

$$D = 70mm$$

$$F_z = 440N$$

$$M_z = 7,3Nm$$

$$H = 38mm$$

**Series 1204 – nízkoprofilové senzory**

$$F_x = 22,2\text{kN}$$

$$M_x = 565\text{Nm}$$

$$m = 4\text{kg}$$

$$F_y = 22,2\text{kN}$$

$$M_y = 565\text{Nm}$$

$$D = 155\text{mm}$$

$$F_z = 44\text{kN}$$

$$M_z = 565\text{Nm}$$

$$H = 44\text{mm}$$



Obr.22: Silomomentový senzor 1204 značky PCB [14]

Series 1302 – senzor tyčového typu

$$F_x = 3100\text{N}$$

$$M_x = 170\text{Nm}$$

$$m = 0,77\text{kg}$$

$$F_y = 3100\text{N}$$

$$M_y = 170\text{Nm}$$

$$D = 52\text{mm}$$

$$F_z = 8900\text{N}$$

$$M_z = 340\text{Nm}$$

$$H = 144\text{mm}$$

3.2.5. FUTEK Advance Sensor Technology, Inc.

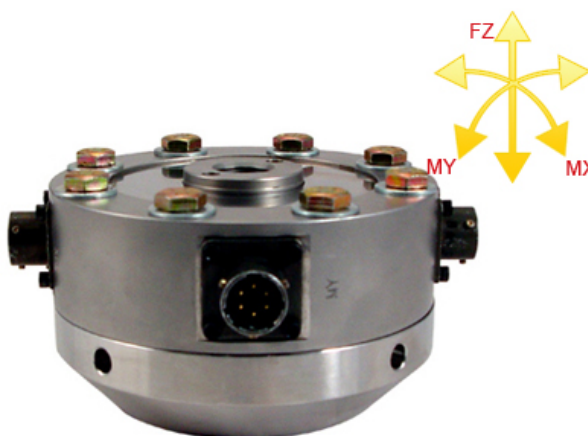
Senzory značky FUTEK se používají v různých odvětvích průmyslu a to hlavně v robotice, automatizaci, automobilním průmyslu, ale taky v lékařství, farmacii, letectví, atd...

Hlavní znaky senzorů:

- použitím 3D modelování a pevnostní analýzy mají optimalizovaný design
- většina senzorů má přímo uvnitř senzoru zabudovaný zesilovač signálu
- obsahují ID chip – identifikační čip pro automatické rozpoznání modelu a druhu snímače
- senzory jsou testovány na odolnost vůči zátěži (až 400 mil. cyklů) k zvýšení jejich kvality
- vývod senzoru je realizován oboustranně ukončenou koncovkou z nerezové oceli, která drží kabel vždy v požadované poloze
- ochrana proti přetížení je integrována přímo v senzoru a tudíž není zapotřebí sekundárního bezpečnostního členu



Typy:

MTA 400 – $F_x = 1\text{kN}$ $m = 9\text{kg}$ $F_y = 1\text{kN}$ $D = 85\text{mm}$ $F_z = 2\text{kN}$ $H = 76\text{mm}$ **MTA 500 –** $M_x = 90\text{Nm}$ $m = 4\text{kg}$ $M_y = 90\text{Nm}$ $D = 105\text{mm}$ $F_z = 9\text{kN}$ $H = 64\text{mm}$ 

Obr.23: Víceosý senzor MTA 500 značky Futek [15]

MBA 500 – $F_z = 900\text{N}$ $m = 184\text{g}$ $M_z = 22,6\text{Nm}$ $D = 50\text{mm}$ $H = 64\text{mm}$

3.2.6. Schunk GmbH & Co.KG



Silomomentový senzor vyvinul institut robotiky a mechatroniky v Německu (German Aerospace Center), který sloučil výhody mechanické pružnosti s optickým měřicím systémem. Pružnost senzoru je realizována prostřednictvím pružin. Rozsah a deformace pružin je úměrná síle, která je měřena optoelektrickým systémem. Vhodným umístěním měřicích membrán – jednotek LED je možno měřit všechny síly i momenty (3 translace, 3 rotace).

V roce 2000 projevila o tento senzor zájem německá společnost Schunk. Vzrůstající požadavky v různých odvětvích průmyslu podporují rozvoj výkonného a propracovaného systému automatizace. K dosažení vyšší flexibility a autonomnosti robotů je použití senzorů



nezbytným. Proto Schunk vyvinul silomomentový senzor FTC, který otevírá nové možnosti využití v oblasti robotiky. Právě ten nabízí řešení problémů v pokročilé automatizaci. [18]

Typy:

Schunk FTC-50-80-V – je silomomentový senzor, který je kombinací mechanické flexibility a optoelektronického principu měření veličin ve všech 6-ti stupních volnosti. K PLC je připojený přes sériové rozhraní RS232. Jeho nejvyšší přenosová rychlost je až 115200 Baud. Pro správné řízení a programování FT senzoru je třeba poslat vhodný příkaz. Ty se podle druhu dělí na:

- Datové příkazy – příkaz poslaný do senzoru je ihned navýšen o 1 a poslán zpět spolu s požadovanými daty
- Příkazy nastavení – senzor po přijetí příkazu čeká na externí vstup pro nastavení např.: Baudrate, limitů sil, vynulování hodnot, atd...
- Informační příkazy

Technické data:

$$F_x = 400\text{N}$$

$$M_x = 14\text{Nm}$$

$$m = 2,56\text{kg}$$

$$F_y = 400\text{N}$$

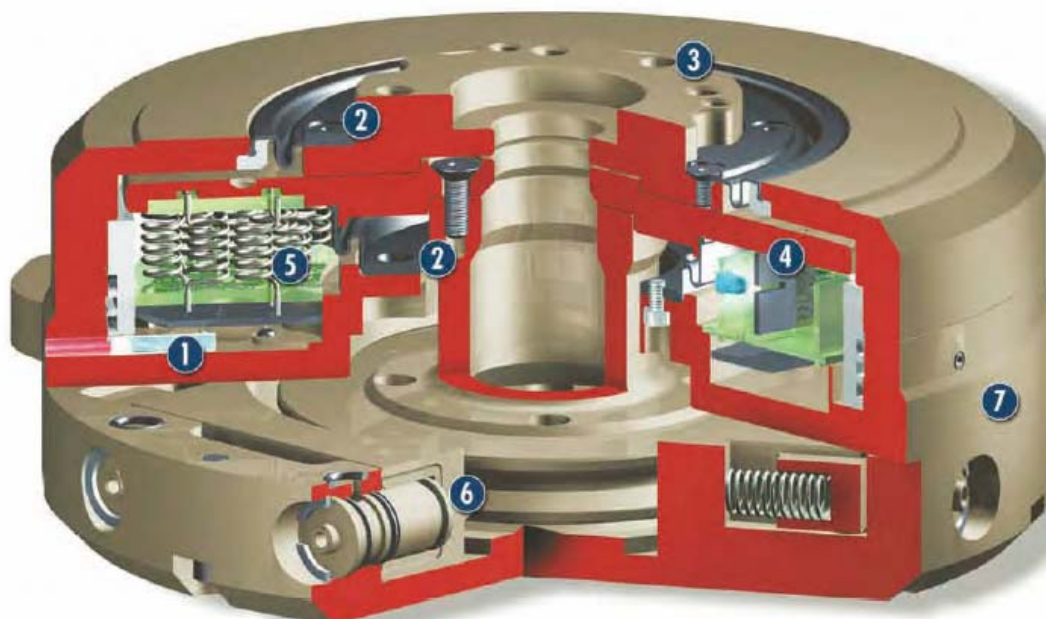
$$M_y = 14\text{m}$$

$$D = 164\text{mm}$$

$$F_z = 350\text{N}$$

$$M_z = 25\text{Nm}$$

$$H = 48\text{mm}$$



Obr.24: Řez senzorem Schunk FTC-50-80-V [16]

Popis senzoru v řezu:

- 1 – je optické vlákno, které signalizuje stav senzoru.
- 2 – je těsnění chránící vnitřní část senzoru proti nečistotám. Zabezpečuje krytí úrovně IP 65.
- 3 – je příruba podle normy ISO 9409-1-A50 a slouží k připevnění uchopovacího zařízení, nebo přímo nástroje.
- 4 – je soustava šesti diod, clonícího pásku se štěrbinami a detektorem dopadajícího světla.
- 5 – jsou pravidelně rozmístěné pružiny o známe tuhosti. Ty tvoří systém, který detekuje působení sil a momentů.
- 6 – jsou pneumatické pístky, které lze senzor tlakovým vzduchem o tlaku 6 bar zamčít proti vychýlení jako ochrana proti přetížení. Tento zámek je volitelný a označuje se v názvu přidáním písmene V (FTC 050-80-V).
- 7 – je vlastní tělo senzoru z vysokopevnostní slitiny hliníku a tvoří pevnou část, ke které patří detektory dopadajícího světla. Pohyblivá část senzoru je s ní spojena přes pružiny a při jejím pohybu dojde k vychýlení pásku se štěrbinou. Tím se změní místo dopadajícího světla na detektoru a z této změny senzor určí velikost působících sil a momentů.

Firma Schunk nabízí silomomentový senzor ve 4 různých verzích a liší se:

- v počtu použitých pružin (FTC-050-80 = 80pružin, FTC-050-40 = 40pružin),
- v rozsahu měřitelných hodnot,
- v hmotnosti daného senzoru (2,56kg nebo 1,56kg),
- v možnosti uzamknutí senzoru proti přetížení.

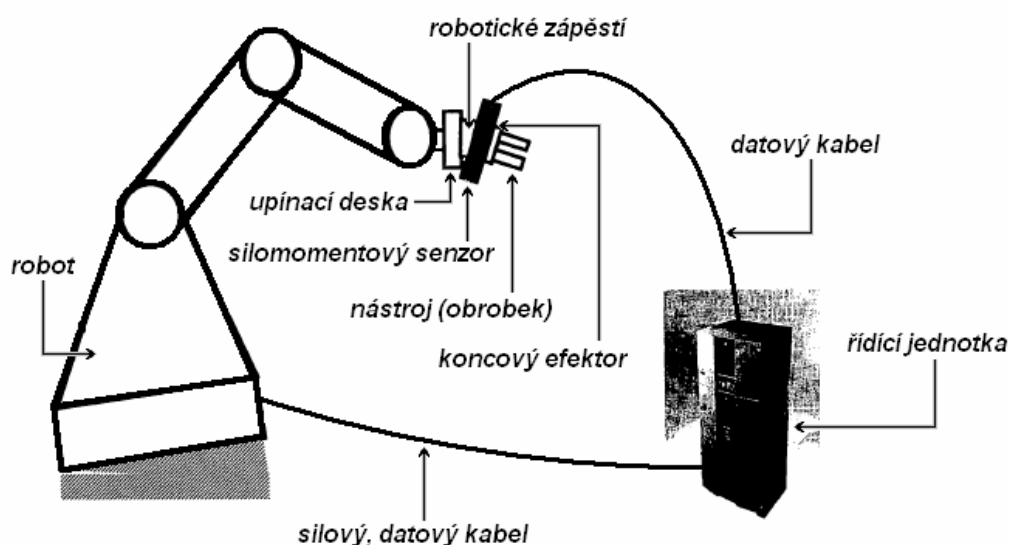


4. Možnosti propojení systému ROBOT - SENZOR

4.1. Varianta 1: Běžné uspořádání systému robot - silomomentový senzor

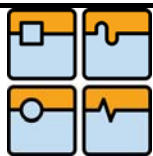
Systém se skládá z průmyslového robotu, upínací desky, silomomentového senzoru připevněného na zápěstí robotu a koncového efektoru, který drží buď nástroj a ten vykonává pracovní činnost na obrobku, nebo drží obrobek a ten je obráběn nástrojem umístěným mimo robotu.

Dále toto konvenční uspořádání obsahuje řídicí systém, který pozůstává z regulátoru síly a softwarového programu, který se používá právě pro řízení pohybů robotu jako odpověď na množství vstupních informací se silomomentového senzoru. Tento řídicí systém je propojen se senzorem a robotem pomocí datového kabelu.



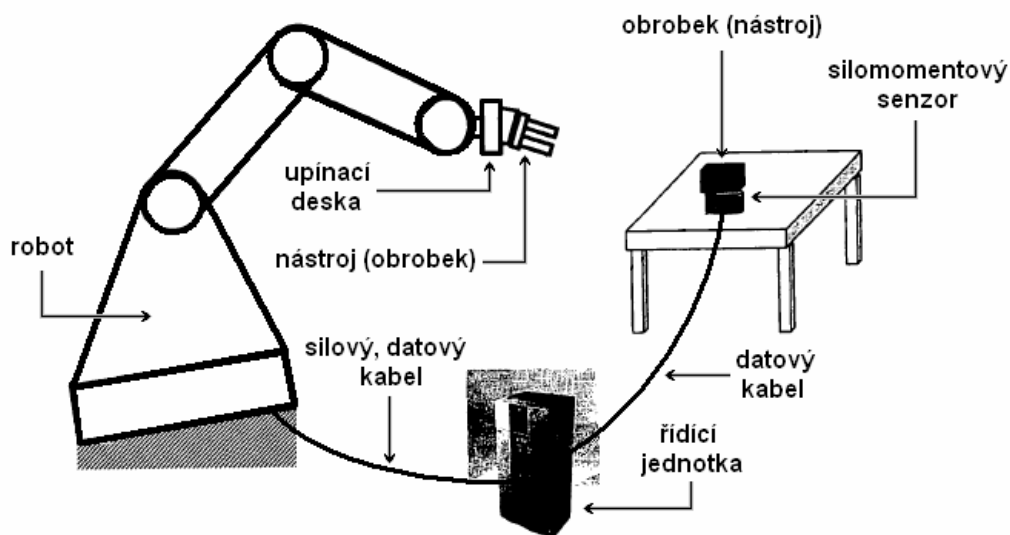
Obr.25: Běžné uspořádání systému robot – senzor [5]

Program pro řízení procesů může být pevně zapsaný do řídicího systému nebo přenosný na médiu CD-ROM či FLASH disku v takové formě, aby mohl být provedený v řídicí systému. Zatímco toto uspořádání má výhody jako kompaktnost a relativní blízkost seskupení komponent, postrádá flexibilitu a trpí výkonovým omezením.



4.2. Varianta 2: Silomomentový senzor upevněn na stole.

Senzor spolu s objektem jsou pevně - nepohyblivě upevněny na stole, oproti variantě 1, kde je senzor přímo namontovaný na robotu. Řídící jednotka přijímá informace ze silomomentového senzoru pomocí datového kabelu a je taky propojena s robotem.



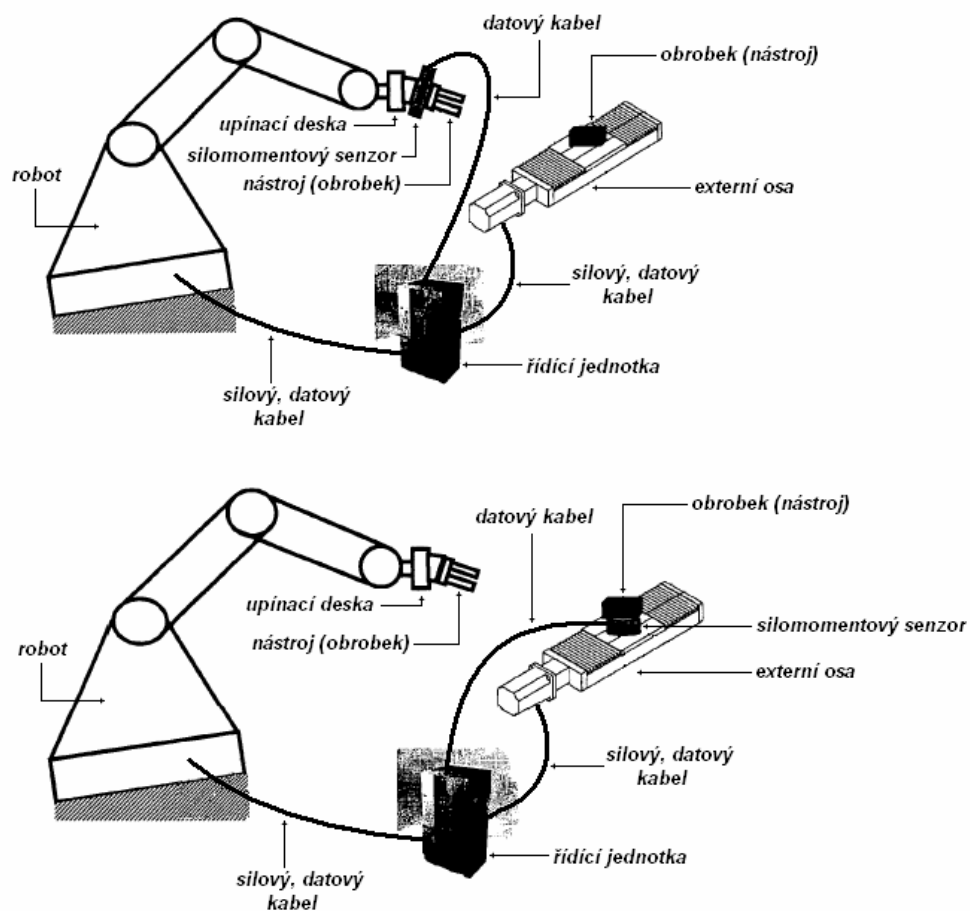
Obr.26: Uspořádání systému robot – senzor, kdy senzor je upevněn mimo robotu [5]

Přínosem tohoto uspořádání ve srovnání s 1. variantou je jednoduchá, ale přesná kompenzace účinků tíhových a setrvačných sil. Objekt může představovat buď obrobek opracovávaný nástrojem, který je držen a obsluhován robotem, nebo nástroj, který vykonává pracovní proces na obrobku drženém robotem.

4.3. Varianta 3: Uspořádání s externí osou.

Toto uspořádání obsahuje navíc externí osu, na které je připevněn objekt. Externí osou se rozumí dopravník nebo nějaké jiné zařízení schopné vykonávat pohyb ve směru jedné osy. V prvním případě je silomomentový senzor připevněn na externí osu, ale řízeným prvkem systému je robot. V druhém případě je silomomentový senzor připevněn na robotu a řízeným prvkem systému je externí osa.

Na rozdíl od 6-ti osého robotu je externí osa citlivější na řízení změn pohybu zadané řídicí jednotkou v důsledku menších setrvačných účinků sil. Toto sestavení je proto velmi prospěšné v aplikaci broušení, kde má být řízena malá a rychle měnící se kontaktní síla.



Obr.27: Uspořádání systému robot – senzor, kdy je použita externí osa [5]

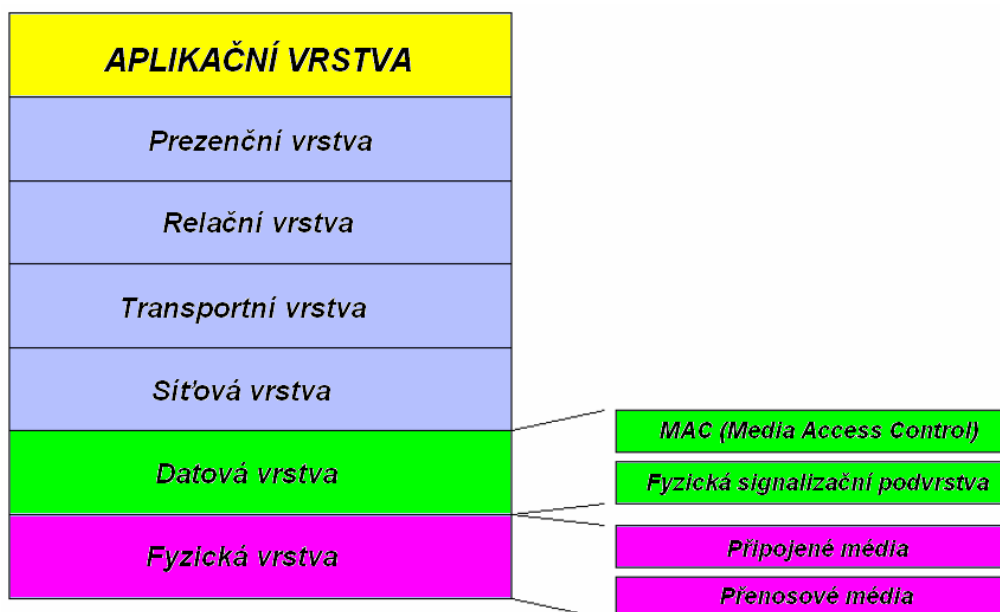
5. Průmyslové sítě

5.1. DeviceNet síť

DeviceNet je nízkourovňový aplikační protokol používaný zařízeními jako jsou senzory a akční členy, s vysokoúrovňovými zařízeními jako PLC nebo jinými programovatelnými řídicími jednotkami. Je založen na standardu sítě CAN (Controller Area Network) v oblasti fyzické telekomunikace, kde DeviceNet využívá CAN hardwaru k definování protokolu aplikační vrstvy hlavně struktury konfigurace úloh, přístupu a řízení automatizovaných zařízení.

5.1.1. DeviceNet a CAN

CAN je standard sériové komunikace používaný pro komunikaci inteligentních zařízení mezi sebou. Na rozdíl od jiných komunikačních standardů, které umožňují rychlý datový přenos až milion Baudů, CAN používá jenom několik stovek. Většina průmyslových aplikací ani tuto rychlost nepotřebuje. Ale kde rychlost a množství přenesených informací je silnou stránkou jiných standardů, CAN vyniká jednoduchostí fyzického rozhraní připojení. Zvláštním znakem CAN protokolu je, že jsou definovány jenom 2 vrstvy z OSI referenčního modelu, a to Datová vrstva a Fyzická vrstva. Datová vrstva se ještě dále rozděluje do Fyzické signalizační podvrstvy a MAC (Media Access Control) podvrstvy. [9]



Obr.28: ISO/OSI model protokolu DeviceNet [9]

DeviceNet jako aplikační vrstva protokolu CAN má tyto hlavní výhody:

- extrémně robustní fyzická vrstva
- otevřená technologie
- nízké hardwarové požadavky
- levné komponenty

Výjimečnou funkcí CAN i DeviceNetu je bitové rozhodování, kdy se využívá prioritní bit. Zprávy vysílané po sběrnici protokolem CAN neobsahují žádné informace o cílovém uzlu, kterému jsou určeny a jsou přijímány všemi ostatními uzly připojenými ke sběrnici. Každá zpráva je uvozena identifikátorem, který udává význam přenášené zprávy a její prioritu. V této síti dominuje 0 nad 1 a teda nejvyšší prioritu má zpráva s identifikátorem 0. Protokol zajišťuje, aby zpráva s vyšší prioritou byla v případě kolize dvou zpráv doručena přednostně. Dále je možné na základě identifikátoru zajistit, aby uzel přijímal pouze ty zprávy, které se ho týkají a tvoří tzv. přijímací filtr. [9]

5.1.2. Spojení DeviceNet

Mezi zařízeními Master a Slave se předem definují ID čísla, aby umožnili optimální proces posílání si zpráv. Použitím filtrů jsou zprávy lehké identifikovány a zpracovány, zatímco všechny ostatní zprávy jsou ignorovány.

Stav nepropojené sítě

Každé zařízení DeviceNet obsahuje speciální přístupový port nazývaný UMP (Unconnected Message Port), který zabezpečuje zaslání několika předdefinovaných zpráv bez předešlého vytváření spojení. Komunikace je ale omezena pouze na vytváření nebo rušení ostatních spojení a k určení zařízení Master a Slave pomocí zprávy. [9]

Stav propojené sítě

V tomto stavu jsou zprávy posílané a přijímané pomocí spojení mezi dvěma zařízeními. Tyto zprávy mohou být typu:

- *Peer zprávy* – lze použít mezi jakýmkoliv dvěma uzly. Ačkoliv tyto zprávy jsou podporovány, neexistuje způsob jak komunikovat mezi zařízeními různých výrobců po tomto kanálu. Vytvoření peer komunikačního kanálu neznamena smysluplnou výměnu dat navzájem. Zavedení peer komunikace může být použito zařízeními

stejného prodejce, kdy sám prodejce definuje formát a obsah zpráv (např. přenos čárových kódů).

- *Explicitní zprávy* – jsou to jednoznačné zprávy vydané zařízením Master jako žádosti o službu k zařízení Slave. Kód této zprávy určuje požadovanou službu spolu s připomínkou obsahující všechny potřebné data k provedení této služby. Služby explicitních zpráv využívají všechny zařízení vrátane konfiguračních nástrojů.
- *I/O zprávy* – mají za úlohu přenášet vstupní/výstupní data mezi zařízeními DeviceNet Master a Slave. Vstupy a výstupy se posuzují z pohledu sítě. Data přenášená ze sítě do zařízení se nazývají *výstupní data* a informace přenášené ze zařízení do sítě DeviceNet jsou *vstupní data*.

Druhy zpráv I/O:

- Dotazy – jsou zprávy typu žádost – odpověď posílané zařízeními Master
- Periodické – jsou zprávy cyklicky posílané zařízeními Slave v určité rychlosti k zařízení Master
- Změny stavu (Change Of State)

Master – Slave spojení

Master jsou zařízení, která shromažďují vstupní data z více zařízení typu Slave, dále třídí a rozšiřují výstupní data.

Toto nastavení komunikace poskytuje zařízení typu Master pomocí přenosu zpráv přiřadit, nastavit a přenést I/O data k jednoduchým zařízením typu Slave.

Spojení OFFLINE

Toto spojení zahrnuje nastavení spojení ve stavu chybové komunikace. Stav chybové komunikace nastává když v zapnutém stavu zařízení detekují stejnou adresu MAC ID. Tyto zařízení nejsou schopny přenášet žádné data nebo vykonávat jakékoliv aplikační činnosti dokud chyba není odstraněna. Chybu je možno odstranit manuálním ptheadresováním sítě, takže žádné jiné zařízení nebude existovat s duplicitní adresou.



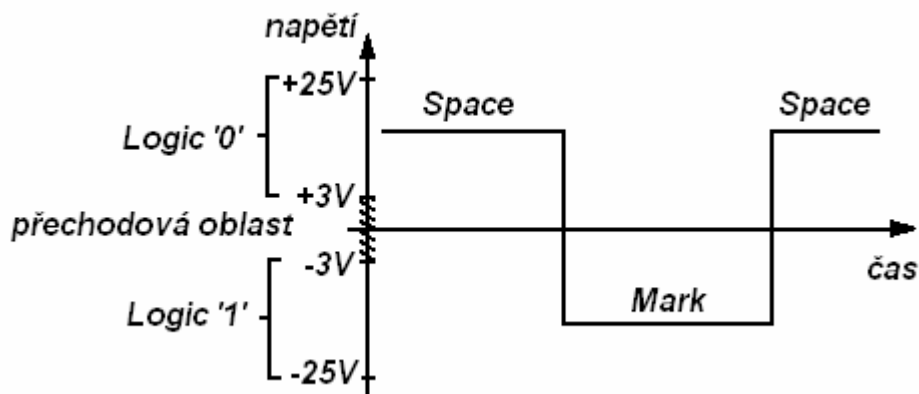
5.2. Sériová linka RS 232

RS-232 umožňuje propojení a vzájemnou sériovou komunikaci dvou zařízení. Jednotlivé bity přenášených dat jsou vysílány postupně za sebou (v sérii) po jediném vodiči, podobně jako u síťové technologie Ethernet nebo rozhraní USB. Standard RS-232 pouze definuje, jak přenést určitou sekvenci bitů a nezabývá se už vyššími vrstvami komunikace. V referenčním modelu ISO/OSI tak představuje pouze fyzickou vrstvu.

Baud rate [Bd]	Max délka [m]
19 200	15
9 600	150
4 800	300
2 400	900

Obr.29: Přenosové rychlosti v závislosti na délce propojení [10]

Přenos informací probíhá asynchronně, pomocí pevně nastavené přenosové rychlosti a synchronizace sestupnou hranou startovacího impulsu. RS 232 používá dvě napěťové úrovně. Logickou 1 (marking state) a 0 (space state). Log. 1 je indikována zápornou úrovní, zatímco logická 0 je přenášena kladnou úrovní výstupních vodičů. [10]



Obr.30: Napěťové úrovně pro logickou 0/1 [10]

Parita - je nejjednodušší způsob jak bez nároků na výpočetní výkon zabezpečit přenos dat. Ve vysílacím zařízení se sečte počet jedničkových bitů a doplní se paritním bitem tak, aby byla zachována předem dohodnutá podmínka sudého nebo lichého počtu jedničkových bitů.

- sudá parita - počet jedničkových bitů + paritní bit = sudé číslo
- lichá parita - počet jedničkových bitů + paritní bit = liché číslo

STOP bit – definuje ukončení rámce. Zároveň zajišťuje určitou prodlevu pro přijímač. Právě v době příjmu STOP bitu většina zařízení zpracovává přijatý BYTE.

HANDSHAKING – je řízení toku dat, které představuje potvrzení příjmu dat či připravenost k přenosu a jeho zahájení na úrovni hardwarového nebo softwarového rozhraní.

Synchronní přenos - znamená, že na nějakém vodiči nebo vodičích se nastaví určitá úroveň, která přenáší informaci a validita informace se potvrdí impulzem, nebo změnou úrovně synchronizačního signálu. Synchronizačním signálem se tedy informace kvantují.

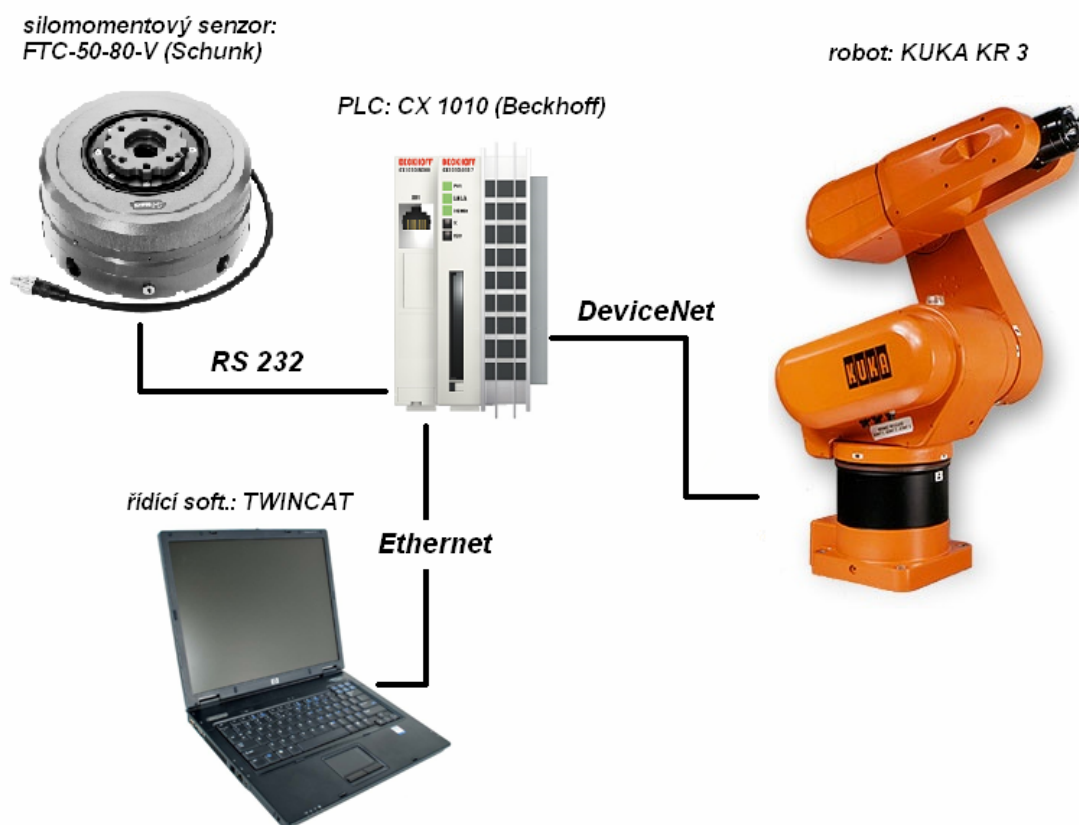
Asynchronní přenos - přenáší data v určitých sekvencích. Data jsou přenášena přesně danou rychlostí a uvozena startovací sekvencí, na kterou se synchronizují všechna přijímací zařízení. Všechny strany obsahují vlastní přesný oscilátor, díky kterému odečítají data v přesně definovaných intervalech. Po ukončení sekvence je další příjem opět synchronizován startovní sekvencí. [10]



6. Experimentální část

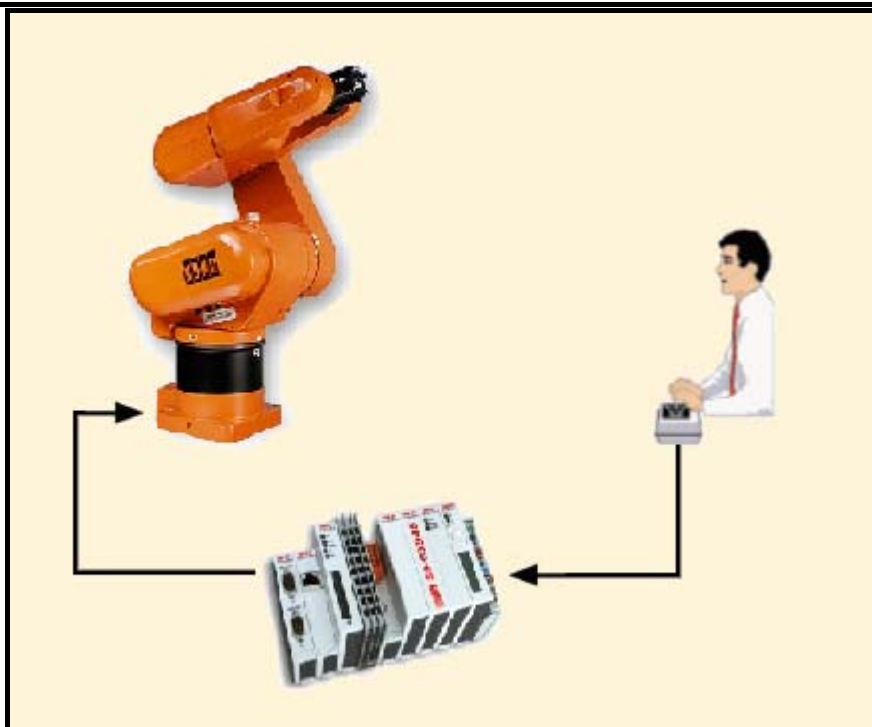
6.1. Koncepce propojení robota se silomomentovým senzorem

Sestavu koncepce propojení tvoří průmyslový robot KUKA KR3, silomomentový senzor Schunk FTC-050-80V a řídicím prvkem je průmyslové PLC Beckhoff typu CX. Komunikace mezi PLC a senzorem probíhá po sériové lince RS232 a dále mezi PLC a robotem po protokolu DeviceNet.



Obr.31: Sestava koncepce propojení

Uspořádání celého systému se skládá ze silomomentového senzoru upevněného na stole – mimo vlastní robot. Výhodou oproti variantě, kdy je FT senzor upevněn na robotu, je jednoduchá a přesná kompenzace účinků tíhových a setrvačných sil. Senzor v tomto případě tvoří jakýsi ovládací joystick.



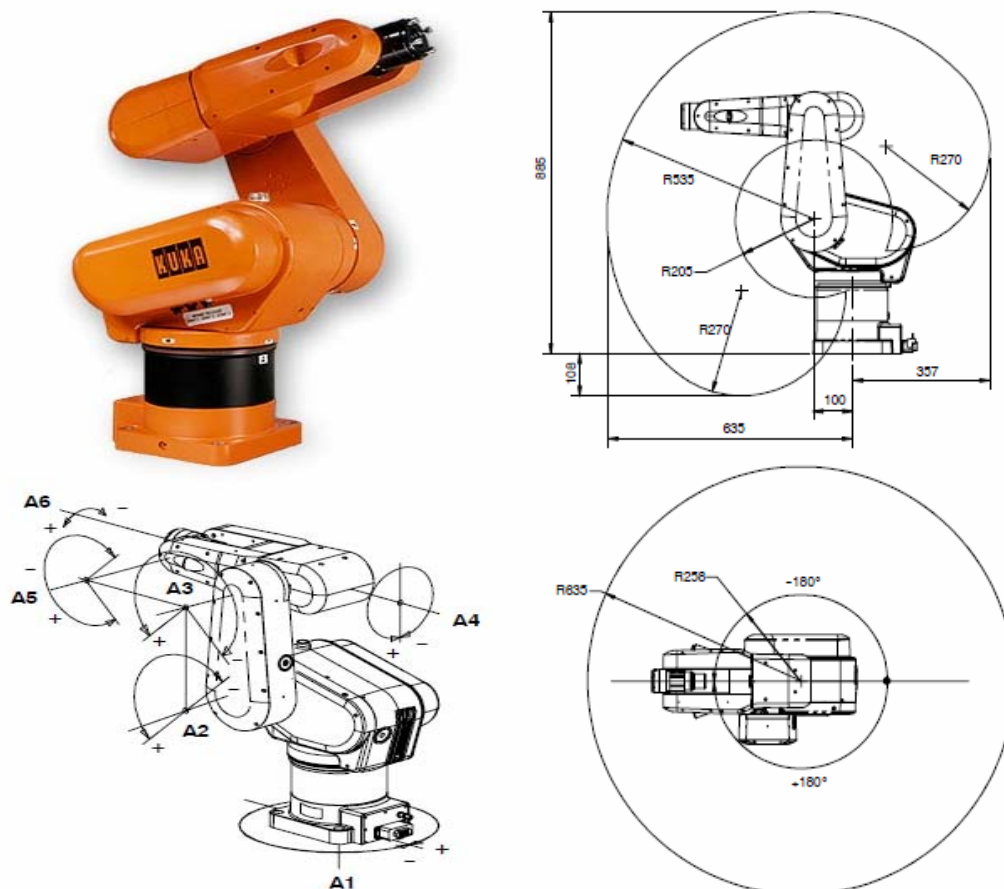
Obr.32: Propojení senzoru v roli joysticku

6.2. Popis zařízení - HARDWARE

Pro praktickou část bylo možné využít tyto dva roboty: KUKA KR3 a KUKA KR15. Výhodou KR15 je její nosnost ramene – až 15kg, co by bylo pro tuto aplikaci dostatečné. KUKA KR3 má nosnost jenom 3kg a proto nelze FT senzor přímo upevnit na robot. Kvůli rekonstrukci laboratoře, ale nebylo možné pracovat na robotu KR15 a proto se problém s nosností řešil vhodnou koncepcí uspořádání systému ROBOT – SENZOR. Na druhé straně robot KR3 má výhody v přesnějším polohování a v novější verzi řídicího software KRC3.

6.2.1. KUKA KR3

Je 6-ti osý průmyslový robot s kloubovou kinematickou strukturou. Používá převodovky typu HarmonicDrive a absolutní odměřovací systém v každém kloubu. Největší možný dosah robotu je 635mm s opakovatelností $\pm 0,05\text{mm}$. Robot může pracovat ve dvou základních modech – modu učení a automatickém režimu. Osy 1 až 3 se nazývají hlavní osy a osy 4 až 6 tvoří tzv. zápěstí robota. Nominální nosnost ramene je 3kg a hmotnost celého robota 53kg.



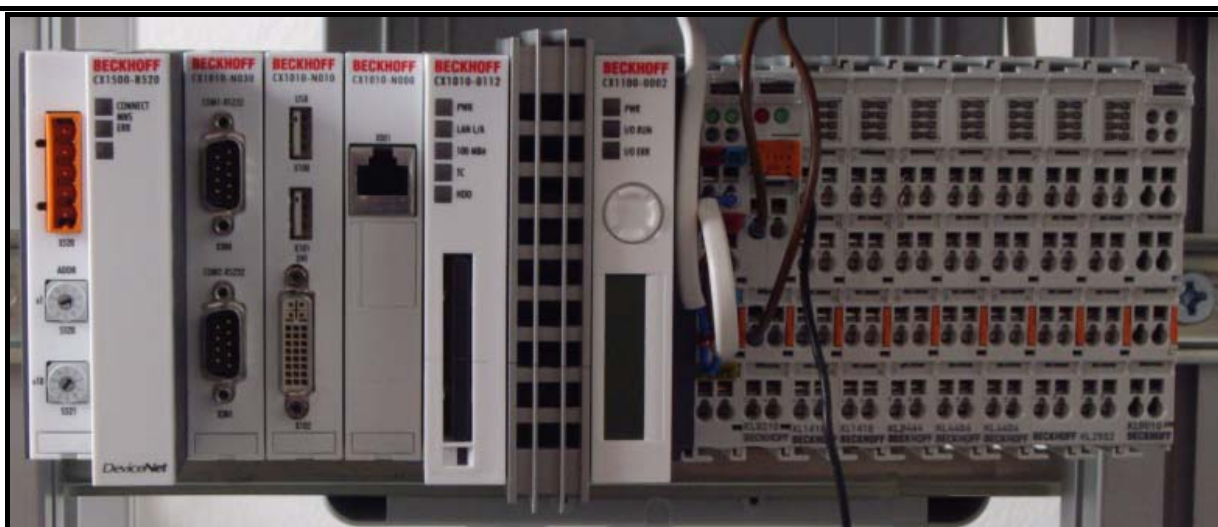
Obr.33: Robot KUKA KR3 – osy a rozsah pracovní oblasti robotu [17]

6.2.2. PLC Beckhoff

PLC – programovatelný logický automat, který se používá pro řízení procesů v reálném čase. Je to průmyslový počítač, který vykonává a zpracovává program cyklicky a je přímo uzpůsoben na napojení na technologické procesy.

Použité moduly:

- CX1010-0112 – je to základní modul, který obsahuje průmyslové CPU s rozhraním Ethernet a USB, dále používá operační systém Microsoft Windows CE a řízení v reálném čase pomocí TwinCATu.
- CX1100-0002 – tvoří napájecí jednotku celého PLC
- CX1010-N030 – modul, který obsahuje sériové rozhraní typu RS232
- CX1500-B520 – modul, který obsahuje DeviceNet rozhraní typu Slave



Obr.34: PLC (Beckhoff) typu CX a další moduly

6.2.3. Schunk FTC-050-80-V

Je silomomentový senzor, který měří hodnoty ve všech 6-ti stupních volnosti. Pro správnou funkci a vyčtení dat je nutno poslat do senzoru vhodný příkaz:

Příkaz 'D' – pošle odpověď ve tvaru 6 x 32 bitů typu FLOAT. Síly a momenty jsou reprezentovány v [N] a [Nm].

Příkaz 'L' – pošle odpověď ve tvaru 6 x 16 bitů typu INTEGER. Síly a momenty jsou reprezentovány ve tvaru [N]/32, [Nm]/1024.

Příkaz 'H' – pošle odpověď ve tvaru 3 x 16 bitů typu INTEGER. Síly jsou reprezentovány ve tvaru [N]/32.

Příkaz 'J' – pošle odpověď ve tvaru 3 x 16 bitů typu INTEGER. Momenty jsou reprezentovány ve tvaru [Nm]/1024.



Obr.35: Senzor Schunk FTC-50

6.3. Popis zařízení – SOFTWARE

6.3.1. TwinCAT

Je program od firmy Beckhoff, který slouží k řízení, programování a monitorování procesů v PLC. Nabízí množství výhod:

- kompatibilita s PC hardwarem
- programovací jazyky v souladu s normou IEC 61131-3
- propojuje všechny běžné a známé sítě, sběrnice, rozhraní a zařízení

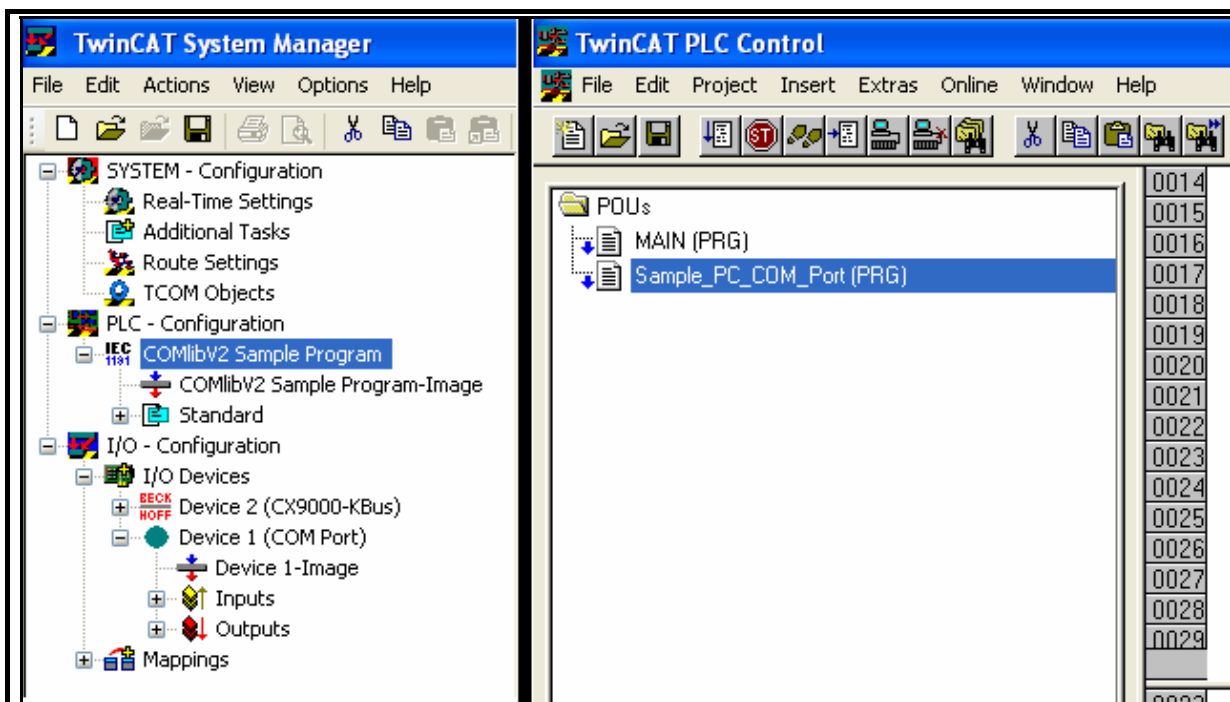
Skládá se z 2 základních částí: *System Manager* a *PLC Control*.

System Manager – je hlavní nástroj pro konfiguraci systému TwinCAT. Propojuje logické vstupy a výstupy programové úlohy spolu s fyzickými pomocí proměnných. Dále umožňuje nastavit Real Time Configuration – řízení reálného času, PLC Configuration – nastavení úlohy a výběr run-time systému a IO Configuration – nastavení a propojení vstupů a výstupů různých rozhraní a zařízení (tzv. namapování).

PLC Control – je kompletně programovací prostředí, pomocí kterého lze vytvořit danou úlohu. Obsahuje záložku POU (Program Organization Unit), ve kterém se přímo vytváří daná úloha pomocí programovacího jazyka; záložku Resources, ve které se definují proměnné, nastavují parametry úlohy, programovacích jazyků a hardware PLC; záložky Vizualization pro názornou ukázkou; Data types pro vytvoření vlastních typů proměnných.

Dále program obsahuje normu IEC 61131-3 pro programovací jazyky, která obsahuje celkově 6 různých typů jazyků:

- Instruction List (IL)
- Structured Text (ST)
- Function Block Diagram (FBD)
- Ladder Diagram (LD)
- Continuous Function Chart (CFC)
- Sequential Function Chart (SFC)



Obr.36: Ukázka prostředí TwinCAT: System Manager (vlevo), PLC Control (vpravo)

6.3.2 KSS – Kuka System Software

Kuka System Software je programové prostředí, které má všechny prvky vyššího programovacího jazyka. Základem je právě KRL – Kuka Robot Language.

Obsahuje všechny základní funkce k provozu systému robota, jako je Plánování dráhy, I/O management, Správa dat a souborů, atd.

Dále v programovém prostředí můžeme nalézt Program editor, Inline formuláře pro programování, Zobrazení hlášení, Konfigurační okno...

Ve všeobecnosti lze využít 3 základní druhy pohybu:

- Point to Point pohyb (zápis PTP)
- Lineární pohyb (zápis LIN)
- Pohyb po kruhové dráze (zápis CIRC)

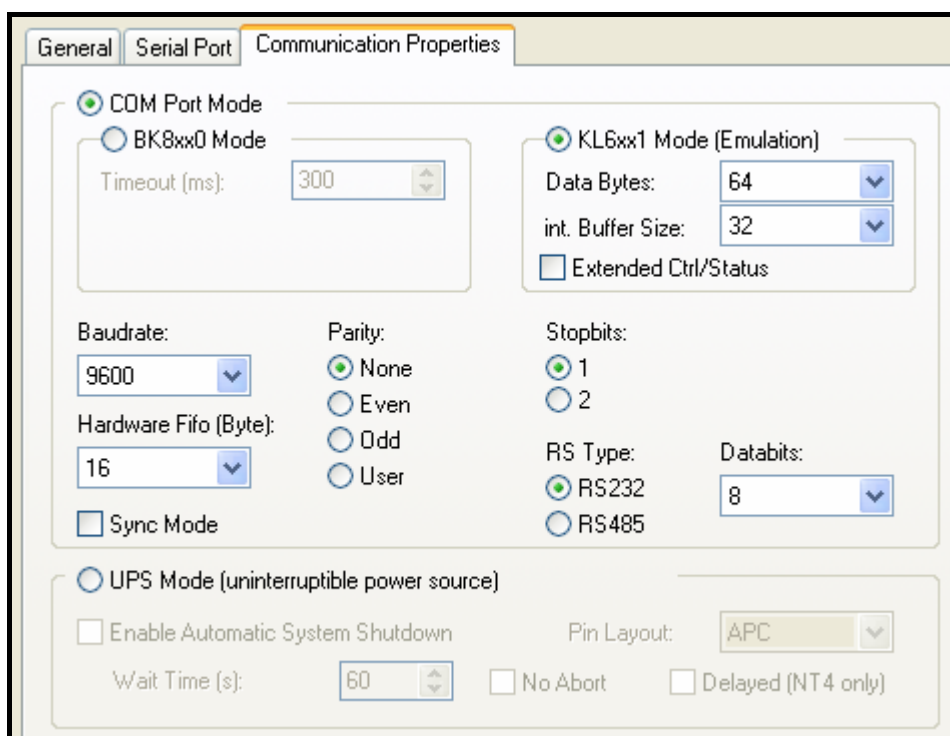
Startovní bod jednoho pohybu je vždy cílovým bodem pohybu předešlého.

6.4. Nastavení komunikace

Kromě fyzického propojení jednotlivých prvků je nutno programově nastavit komunikaci mezi jednotlivými zařízeními. V programu System Manager je nejdřív zapotřebí vybrat vhodný cílový runtime system, a to systém průmyslového PLC typu CX (tlačítko Choose runtime system). Dalším krokem je prozkoumání dostupných zařízení, připojených k PLC (tzv. Scan devices). Ovšem sériové rozhraní je nutno přidat ručně.

Pak je třeba připojit předem připravený program do PLC Configuration a provázat programové proměnné s fyzickým místem v paměti.

U zařízení sériového rozhraní (COM port) lze nastavit parametry přenosu informací a to hlavně: typ sériové linky (RS232, RS485); rychlost přenosu (Baudrate); paritní bit, stopbit a počet databitů. V naší aplikaci je nastavení následovné:



Obr.37: Nastavení sériové linky v programu System Manager

Pro nastavení komunikace robotu s PLC je třeba v System Manageru pod zařízením DeviceNet přidat vlastní proměnnou, která slouží k předání vyčtených hodnot z FT senzoru do robotu – v tomto případě jsou to 3 proměnné: reals[1], reals[2], reals[3].

Dále je nutno v systémovém souboru řízení robotu *iosys.ini* nastavit paměťový prostor a správnou MAC adresu ve tvaru:

INW1 = 12, 0, x3

Na levé straně od "=" se nastavuje paměťový prostor na straně robotu a na straně pravé se definuje paměťový prostor DeviceNetu.

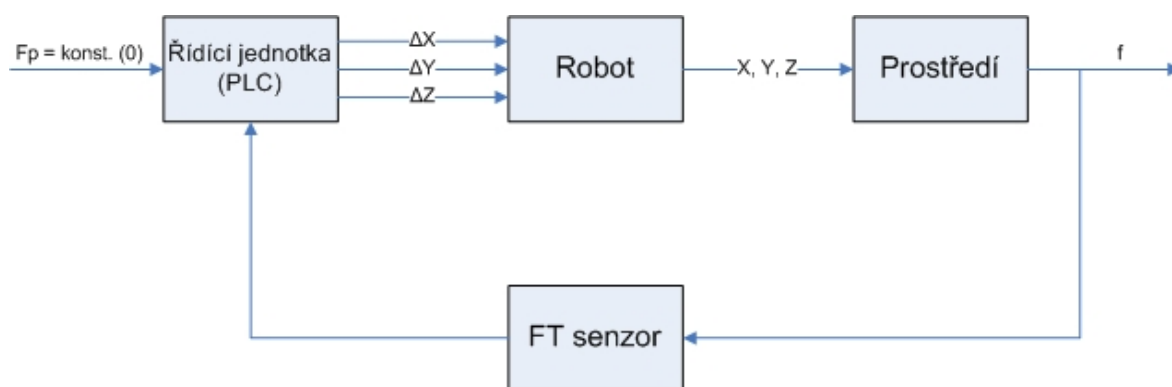
"INW1" – označuje vstupní hodnotu ve velikosti 1 Word (16 bitů)

"12" – MAC adresa zařízení

"0" – označuje namapovaný fyzický prostor začínající od bytu 0

"x3" – označuje počet opakování vyhrazeného paměťového prostoru

6.5. Regulace silomomentového řízení



Obr.38: Blokový diagram FT řízení

F_p – je požadovaná hodnota síly

f – je síla vyvozena člověkem na senzor FT

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – jsou přírůstky souřadnic v osách, o které se má robot posunout v daném směru

X, Y, Z – jsou souřadnice, ve kterých se robot právě nachází

V aplikaci přímého navádění "Prostředí" představuje člověka, který působí danou silou " f " na silomomentový senzor. Ten periodicky vyčítá složky sil ve všech směrech a posílá je do "Řídicí jednotky PLC". Zde se hodnoty porovnají s požadovanou velikostí síly a následně upraví do požadovaného tvaru ve formě přírůstků souřadnic. Dále se tyto data pošlou do "Robotu" a ten vykoná pohyb v požadovaném směru. Tuto regulační smyčku uzavírá interakce člověka s robotem, kde člověk přizpůsobuje vynaloženou sílu na senzor podle aktuální polohy robotu.



6.6. Princip činnosti

1. část: Poslání dotazu do senzoru FTC

Nejdříve se musí senzor zkalibrovat a tím vynulovat přídavné zatížení (např. použití měřící sondy nebo joysticu). To se děje posláním příkazu "z" pomocí funkčního bloku "SendString". Dále je nutno poslat dotaz ve tvaru 1 bytu "H" pro vyčtení hodnot datového typu integer a všech 3 sil. Aby byl pohyb robota plynulý a dostatečně reagoval na podněty z FTC senzoru, posílá se dotaz cyklicky v čase $T = 10\text{ms}$. Pokud proměnná Busy a Error nadobude hodnoty FALSE, poslání dotazu je úspěšné.

```
Send      (SendString:= 'H',  
          TXbuffer:= TxBuffer1,  
          Busy=> SendBusy,  
          Error=> SendErrorID);
```

2. část: Příjem odpovědi ze senzoru FTC

Data ze senzoru jsou uloženy do 3 proměnných (Fx, Fy, Fz). Proto je vytvořen vlastní typ proměnné s názvem "mydata", který se skládá z:

- prefixu – typu byte (-odpověď ze senzoru ve tvaru 'G'-)
- A, B, C – typu integer (-vyčtené hodnoty sil-)
- Status – typu integer (-status přenosu-)

TYPE mydata :

STRUCT

PREFIX: BYTE;

A: INT;

B: INT;

C: INT;

Status: INT;

END_STRUCT

END_TYPE

Data jsou ukládány pomocí funkčního bloku "ReceiveData" do proměnné "FTC", která je datového typu "mydata". Jedním z atributů FB_ReceiveData je právě námi vytvořený vlastní datový typ proměnné. Pokud Busy a Error nabývají hodnoty FALSE, příjem odpovědi je úspěšný. V opačném případě je třeba poslat dotaz znova a opakovat příjem dat.

```
myReceiveData(
    pReceiveData:=ADR(FTC) ,
    SizeReceiveData:=15,
    busy=>busy ,
    Error=> Error,)
```

3. část: Filtrace a úprava naměřených hodnot

Přijaté hodnoty ze senzoru po dotazu typu "H" nabývají reálních hodnot až po podílu číslem 32 (pro správnou interpretaci v [N]), přičemž proměnné A, B, C jsou již typu REAL.

```
Fx := A / 32;
Fy := B / 32;
Fz := C / 32;
```

Dále je třeba odstranit kolísání (oscilaci) naměřených údajů pomocí vhodného filtru, aby robot nereagoval na příliš malé výchylky, které plynou jenom z rušivých podnětů z okolí. To se provede pomocí funkčního bloku digitálního filtru:

FB_CTRL_DIGITAL_FILTER.

Dalším krokem je vytvoření funkční závislosti mezi vyčtenými hodnotami sil a souřadnicemi pohybu robotu. To lze udělat použitím PI (Proporcionálně Integračního) regulátoru:

FB_CTRL_PI,

kde výstupem jsou právě souřadnice bodu dalšího pohybu robotu. Jelikož navádění v prostoru vyžaduje souřadnice ve všech směrech (x, y, z), je nutno použít 3 PI regulátory.

4. část: Pohyb robotu a kompenzace sil na hodnotu "0"

Upravené vyčtené přírůstky souřadnic dále zpracovává program v softwaru KSS (Kuka System Software) řídicího systému robotu, kde se s předstihem a aproximací dráhy vykonává vlastní pohyb robotu.

```

$ADVANCE = 1                                (-označuje předstih ve vyhodnocování aproximace dráhy-)
while RUN
    distance = 2 ;[mm]                        (-interpolace ve vzdálenosti 2mm-)
    magnitude = sqrt(reals[1]*reals[1] + reals[2]*reals[2] + reals[3]*reals[3])
                                                (-výpočet vektoru posunutí-)
    setPos()                                  (-výpočet relativního posuvu v jednotlivých osách-)
    LIN_REL relPos c_vel                      (-lineární relativní pohyb robotu-)
endwhile

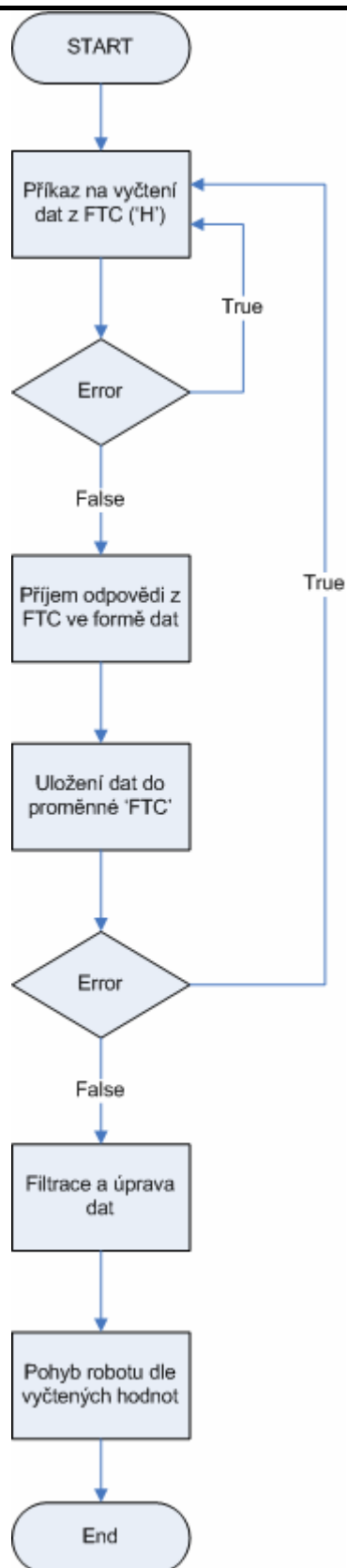
setPos()
    relPos.x = distance * reals[1] / magnitude  (-výpočet relativního posuvu v ose x-)
    relPos.y = distance * reals[2] / magnitude  (-výpočet relativního posuvu v ose y-)
    relPos.z = distance * reals[3] / magnitude  (-výpočet relativního posuvu v ose z-)

```

Celý proces navádění robotu v prostoru dále popisuje postupový diagram (viz. Obr.39), kde lze vidět princip vyčtení dat ze senzoru, následní příjem a zápis hodnot do vlastní proměnné FTC, úpravu dat filtrací a regulací PI regulátorem a následní pohyb robotu do požadované polohy.



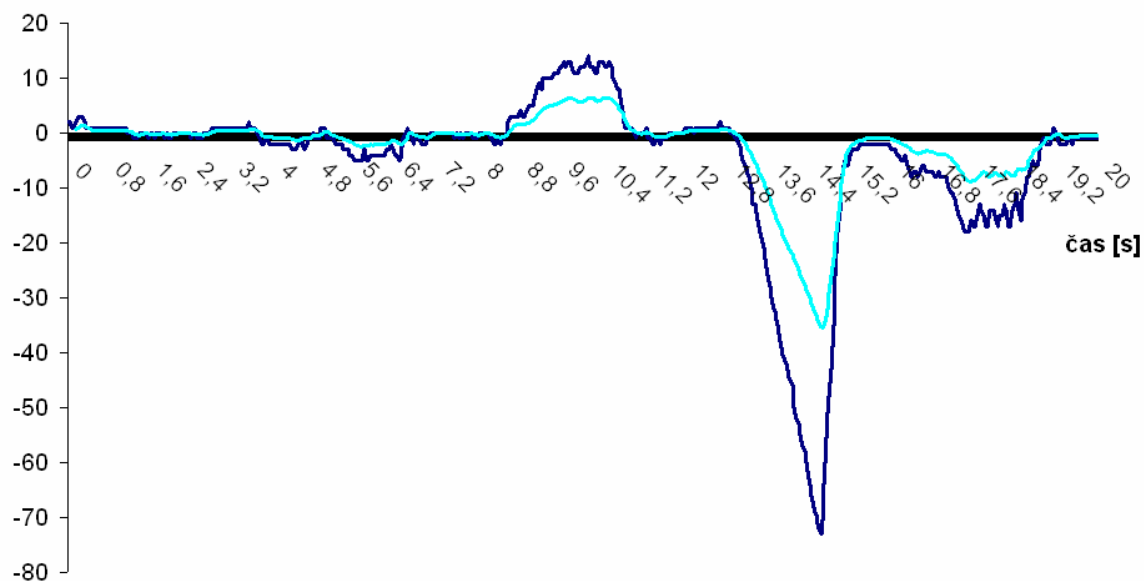
DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obr.39: Vývojový diagram procesu přímého navádění v prostoru



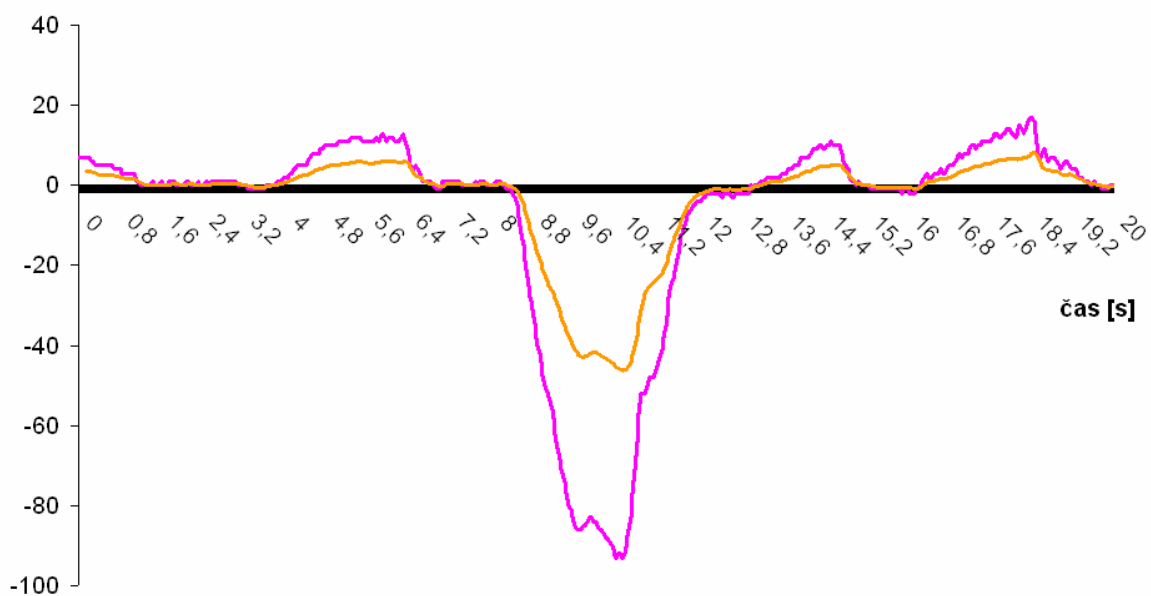
F_x [N], posuv [mm]



— vyčtené síly F_x — posuv ve směru x

Obr.40: Hodnoty vyčtené síly F_x a posuvu robotu ve směru x

F_y [N], posuv [mm]

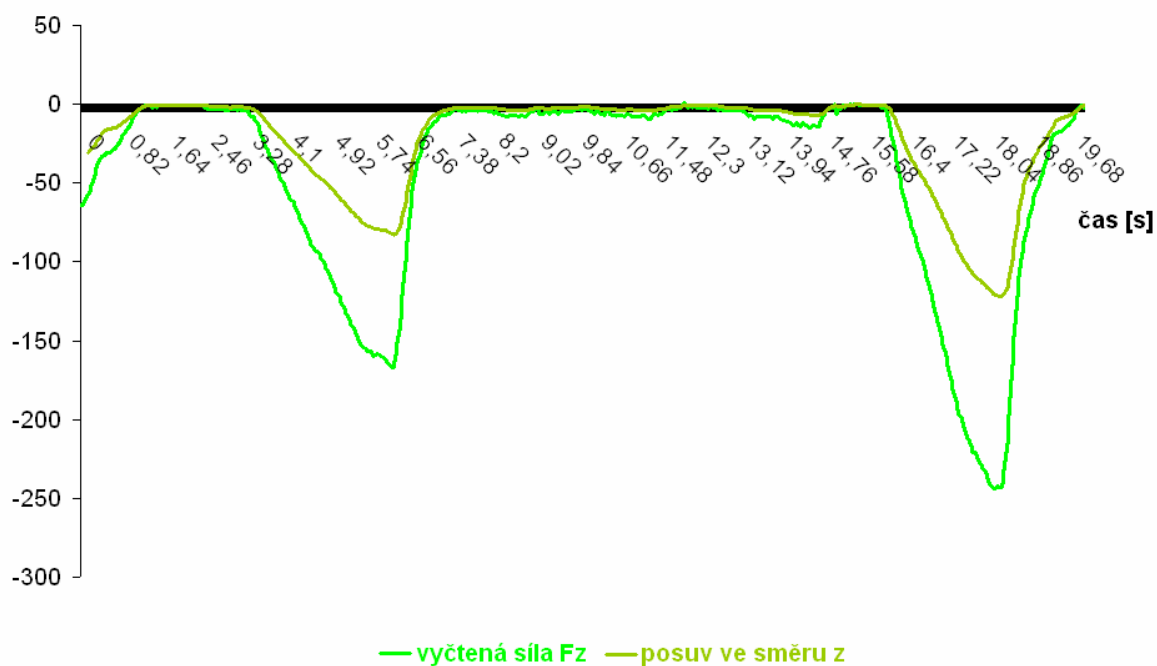


— vyčtená síla F_y — posuv ve směru y

Obr.41: Hodnoty vyčtené síly F_y a posuvu robotu ve směru y



Fz [N], posuv [mm]



Obr.42: Hodnoty vyčtené síly Fz a posuvu robotu ve směru z

Tyto hodnoty byly vyčteny a zaznamenány pomocí funkce "Sampling Trace" v programovém prostředí PLC Control. Ze znázorněných grafů je vidět rozdíl mezi vyčtenými a zpracovanými hodnotami pomocí PI regulátoru.

7. Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s možnostmi silomomentového řízení FTC průmyslových robotů KUKA a vytvořit prakticky orientovanou demonstrační aplikaci se zaměřením na možnosti přímého navádění robotu v prostoru.

V teoretickém úvodě je rozpracována problematika průmyslových robotů, jejich řízení, vlastnosti a interakce člověka s robotem. Dále práce pojednává o základní stavbě silomomentových senzorů, uvádí přehled druhů FTC senzorů dostupných v současné době na trhu, různé varianty propojení systému ROBOT – SENZOR a popisuje vlastnosti sériové linky RS 232 a sítě DeviceNet, které jsou použity pro komunikaci mezi zařízeními v praktické aplikaci.

V experimentální části je řešena vhodná koncepce propojení, protože kvůli rekonstrukci laboratoře Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky nebylo možné demonstrační aplikaci provádět na zadaném robotu KUKA KR 15/2. V alternativní variantě byl použit robot KUKA KR 3, který však nesplňuje kritérium nosnosti, a proto je senzor použit jako ovládací prvek – joystick.

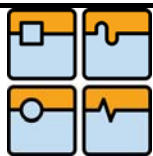
Pozornost se dále zaměřuje na problematiku komunikace a správného nastavení softwaru pro řízení probíhajících procesů v PLC jako i popis principu činnosti vytvořeného programu pro přímé ovládání pohybu robotu. Vypracovaný program obsahuje základní části pro vyčtení a zápis hodnot ze senzoru, jejich následní úpravu v PI regulátoru a zpracování dat v systému robotu potřebného k samotnému pohybu v žádaném směru.

Současným trendem v průmyslu je snaha po zavádění robotizace v rámci celých technologických procesů, kde se roboty mohou uplatnit i v kombinaci s jinými automatizačními prostředky. Poukazují na větší flexibilitu, méně náročnou obsluhu, snižování nákladů a vyšší konkurenceschopnost. Průmyslový robot vybaven silomomentovým senzorem otevírá nové možnosti k řešení různých aplikací jako výsledek týmové spolupráce člověka s robotem.

8. Použitá literatura

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk; KNOFLÍČEK, Radek. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2000. 185 s. ISBN 80-88922-27-5.
- [2] DAVIES, Sean. The Dream Team. *Computing & Control Engineering*. 2006, 17, s. 26-29. ISSN 0956-3385.
- [3] KOLÍBAL, Zdeněk. *Průmyslové roboty I.-Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů*. Brno, 185s.
- [4] RAUSCH, Jacqueline. *Engineering Haptic Devices*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. Force Sensor Design, s. 44. ISBN 978-3-540-88247-3.
- [5] *Force Controll Robots*. USA, Ohio: World Intellectual Property Organization, 2009. 35 s. WO 2009/020600 A1.
- [6] KOLÍBAL, Zdeněk; KNOFLÍČEK, Radek. *Robotické systémy vyšších generací*. Brno, 2005. 207 s.
- [7] *KUKA System Software: Návod k použití a k programování*. Německo : KUKA Roboter GmbH, 2006. 124 s.
- [8] CHURÝ, Lukáš. *Programujte* [online]. 2006 [cit. 2010-03-29]. Robotika II. Dostupné z WWW: <http://programujte.com/?akce=clanek&cl=2006032007-robotika-ii/>
- [9] *Real Time Automation* [online]. 2009 [cit. 2010-04-14]. DeviceNet Introduction. Dostupné z WWW: <http://www.rtaautomation.com/devicenet/>
- [10] OLMR, Vít. *Hw.cz* [online]. 2005 [cit. 2010-02-05]. Sériová linka RS-232. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/rs-232/>
- [11] *ATI Industrial Automation* [online]. 2009 [cit. 2009-11-24]. Six-Axis Force/Torque Sensors. Dostupné z WWW: <http://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx/>

- [12] *JR3, Inc.* [online]. 2009 [cit. 2009-11-28]. Multi-Axis Load Cell Technologies. Dostupné z WWW: <http://www.jr3.com/MseriesData.html/>
- [13] *AMTI* [online]. 2009 [cit. 2009-11-20]. Multiaxis Loadcells. Dostupné z WWW: <http://amti.biz/>
- [14] *PCB Piezotronics* [online]. 2007 [cit. 2009-12-05]. Product Catalog. Dostupné z WWW: <http://www.pcb.com/products/literature.php#Catalogs/>
- [15] *FUTEK* [online]. 2007 [cit. 2009-12-10]. Multi Axis Load Cell. Dostupné z WWW: <http://www.futek.com/product.aspx?t=multicomponent/>
- [16] *Schunk* [online]. 2008 [cit. 2010-03-18]. Robot Accessories. Dostupné z WWW: http://www.schunk.com/schunk/schunk_websites/products/products_level_3/product_level3.html?country=USA&lngCode=EN&lngCode2=EN&product_level_1=244&product_level_2=252&product_level_3=296
- [17] *KUKA* [online]. 2005 [cit. 2010-04-07]. Specification | KR 3. Dostupné z WWW: <http://www.kuka-robotics.com/en/downloads/>
- [18] *Technology Forum* [online]. 2009 [cit. 2010-01-02]. Success Stories. Dostupné z WWW: [http://www.technology-forum.com/index.php?id=95&tx_wfqbe_pi1\[uid\]=24](http://www.technology-forum.com/index.php?id=95&tx_wfqbe_pi1[uid]=24)
- [19] L. Sciavicco, B. Siciliano: Robotics Modelling, Planning and Control. Springer London, 2008
- [20] PIRES, J. N. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future. Springer, 2007. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3
- [21] WOLF, A., STEINMANN, R. SCHUNK, H. Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks. Springer, 2005. 242 s. ISBN 978-3-540-27718-7



9. Přílohy

9.1. Program senzor FTC

Data types

TYPE mydata :

STRUCT

PREFIX : BYTE;

A : INT;

B : INT;

C : INT;

Status:INT;

END_STRUCT

END_TYPE

PROGRAM Sample_PC_COM_Port

VAR

Timer: TON;

Send: SendString;

SendBusy: BOOL;

SendErrorID: ComError_t;

MyReceiveData: ReceiveData;

pMyPrefix: BYTE;

LenPrefix: BYTE;

Fx: REAL;

Fy: REAL;

Fz: REAL;

Fa: REAL;

Fb: REAL;

Fc: REAL;

FTC: MYDATA;

Timeout : TIME:=T#1s;

Reset: BOOL;

DataReceived: BOOL;



DIPLOMOVÁ PRÁCE

```
    busy: BOOL;
    Error: ComError_t;
    RxTimeout: BOOL;
    LenReceiveData : UDINT;
    RXbuffer: ComBuffer;
    COMportControl: SerialLineControl;
    COMportControlError: BOOL;
    COMportControlErrorID: ComError_t;
END_VAR

-----

Timer(IN:=TRUE, PT:=T#10ms);
IF Timer.Q OR Send.Busy THEN
    Send(SendString:= 'H',
        TXbuffer:= TxBuffer1,
        Busy=> SendBusy,
        Error=> SendErrorID);
    Timer(IN:=FALSE);
END_IF

myReceiveData(    pPrefix:=ADR(pMyPrefix),
                  LenPrefix:=,
                  pSuffix:= ,
                  LenSuffix:= ,
                  pReceiveData:=ADR(FTC) ,
                  SizeReceiveData:=9,
                  Timeout:= T#1s ,
                  Reset:= FALSE,
                  RXbuffer:=RxBuffer1 ,
                  DataReceived=>DataReceived ,
                  busy=>busy ,
                  Error=> Error,
                  RxTimeout=>RxTimeout ,
                  LenReceiveData=> LenReceiveData);
```



```
Fx := INT_TO_REAL (A);
```

```
Fy := INT_TO_REAL (B);
```

```
Fz := INT_TO_REAL (C);
```

```
Fc:= Fz /32;
```

```
COMportControl(  Mode:= SERIALLINE_MODE_PC_COM_PORT,  
                  pComIn:= ADR(COMin_COMport),  
                  pComOut:= ADR(COMout_COMport),  
                  SizeComIn:= SIZEOF(COMin_COMport),  
                  TxBuffer:= TxBuffer1,  
                  RxBuffer:= RxBuffer1,  
                  Error=> COMportControlError,  
                  ErrorID=> COMportControlErrorID);
```

PROGRAM PI_REGULATOR

```
VAR
```

```
    fSetpointValue: REAL := 0;
```

```
    fManSyncValue: REAL;
```

```
    bSync: BOOL;
```

```
    FxOut: REAL;
```

```
    FyOut: REAL;
```

```
    FzOut: REAL;
```

```
    bHold: BOOL;
```

```
    eMode: E_CTRL_MODE;
```

```
    stCTRL_PI_PARAMS: ST_CTRL_PI_PARAMS;
```

```
    eErrorId: E_CTRL_ERRORCODES;
```

```
    bError: BOOL;
```

```
    bARWactive: BOOL;
```

```
    fbCTRL_PI_Fx: FB_CTRL_PI;
```

```
    fbCTRL_PI_Fy: FB_CTRL_PI;
```

```
    fbCTRL_PI_Fz: FB_CTRL_PI;
```

```
    bInit: BOOL := TRUE;
```

```
END_VAR
```



DIPLOMOVÁ PRÁCE

IF bInit

THEN

```
stCTRL_PI_PARAMS.tCtrlCycleTime:= T#2ms;  
stCTRL_PI_PARAMS.tTaskCycleTime:= T#2ms;  
stCTRL_PI_PARAMS.tTn:= T#1ms;  
stCTRL_PI_PARAMS.fKp:= 2;  
stCTRL_PI_PARAMS.fOutMaxLimit:= 400;  
stCTRL_PI_PARAMS.fOutMinLimit:= -400;  
eMode:= eCTRL_MODE_ACTIVE;  
bInit:= FALSE;
```

END_IF

```
fbCTRL_PI_Fx(    fSetpointValue:= fSetpointValue,  
                  fActualValue:= Fx,  
                  fManSyncValue:= fManSyncValue,  
                  bSync:= bSync,  
                  eMode:= eMode,  
                  bHold:= bHold,  
                  stParams:= stCTRL_PI_PARAMS,  
                  fOut=> FxOut,  
                  bARWactive=> bARWactive,  
                  eErrorId=> eErrorId,  
                  bError=> bError);
```

```
fbCTRL_PI_Fy(    fSetpointValue:= fSetpointValue,  
                  fActualValue:= Fy,  
                  fManSyncValue:= fManSyncValue,  
                  bSync:= bSync,  
                  eMode:= eMode,  
                  bHold:= bHold,  
                  stParams:= stCTRL_PI_PARAMS,  
                  fOut=> FyOut,  
                  bARWactive=> bARWactive,  
                  eErrorId=> eErrorId,  
                  bError=> bError);
```



```
fbCTRL_PI_Fz(      fSetpointValue:= fSetpointValue,  
                   fActualValue:= Fz,  
                   fManSyncValue:= fManSyncValue,  
                   bSync:= bSync,  
                   eMode:= eMode,  
                   bHold:= bHold,  
                   stParams:= stCTRL_PI_PARAMS,  
                   fOut=> FzOut,  
                   bARWactive=> bARWactive,  
                   eErrorId=> eErrorId,  
                   bError=> bError);
```

9.2. Program pohyb robotu

```
DEF FTC_01()  
  --- Initialization ---  
  BAS (#INITMOV,0)  
  BAS (#BASE,2 )  
  BAS (#TOOL,2 )  
  
  $ADVANCE = 1  
  while RUN  
    distance = 2 ;[mm]  
    magnitude = sqrt(reals[1]*reals[1] + reals[2]*reals[2] + reals[3]*reals[3])  
    setPos()  
    LIN_REL relPos c_vel  
  endwhile  
END  
  
DEF setPos()  
  relPos.x = distance * reals[1] / magnitude  
  relPos.y = distance * reals[2] / magnitude  
  relPos.z = distance * reals[3] / magnitude  
END
```




9.3. Fotografie pracoviště

